

OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO ASOCIADA AL  
SISTEMA NEUMÁTICO DE LA FLOTA DE TALADROS CATERPILLAR MD6250  
EN OPERACIÓN EN LA MINA CALENTURITAS BAJO LA METODOLOGIA RCM

WERMAN DAVID ARAGÓN LÓPEZ  
CESAR ANDRÉS ARQUEZ VILLANUEVA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA

2020

OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO ASOCIADA AL  
SISTEMA NEUMÁTICO DE LA FLOTA DE TALADROS CATERPILLAR MD6250  
EN OPERACIÓN EN LA MINA CALENTURITAS BAJO LA METODOLOGIA RCM

WERMAN DAVID ARAGÓN LÓPEZ  
CESAR ANDRÉS ARQUEZ VILLANUEVA

Monografía de grado presentada como requisito para optar al título de  
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO

Director:

PEDRO JOSE DIAZ GUERRERO

Ingeniero Mecánico

Maestría en métodos numéricos aplicados al cálculo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA

2020

## DEDICATORIA

*A Dios por brindarme salud, fortaleza, bendiciones y guiarme en tan importante momento de mi vida profesional como lo es obtener este título de postgrado.*

*A mis padres Werman Aragón y Maritza López, por todo el amor y los consejos que me han brindado a lo largo de mi vida, los cuales me han permitido llegar hasta aquí y cumplir este sueño tan anhelado.*

*De manera muy especial a mí pareja María Gutiérrez de Piñeres, por ser la persona que ilumina mi camino; su amor, cariño y constantes lecciones durante todo este proceso fueron primordiales para concretar con éxito esta meta.*

*A mis jefes y compañeros de trabajos de Drummond, los cuales me brindaron su apoyo en todo momento en lo que respecta a permisos y reemplazo en los turnos de trabajo.*

*A mis familiares por la unión que nos caracteriza, sus palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y con ello poder culminar este proyecto de estudio.*

**Werman David Aragón López**

## **DEDICATORIA**

*A Dios por brindarme salud, fortaleza, bendiciones y guiarme en tan importante momento de mi vida profesional como lo es obtener este título de postgrado.*

*A mis padres Benjamín Arquez y Adalgiza Villanueva, por todo el amor y los consejos que me han brindado a lo largo de mi vida, los cuales me han permitido llegar hasta aquí y cumplir este sueño tan anhelado.*

*A mis familiares por la unión que nos caracteriza, sus palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y con ello poder culminar este proyecto de estudio.*

**Cesar Andrés Arquez Villanueva**

## AGRADECIMIENTOS

*Agradecemos principalmente a Dios, por ser el guía e inspirador en nuestras vidas, por darnos el conocimiento y la perseverancia para cumplir este anhelo sin desfallecer.*

*De igual forma, agradecemos a nuestros profesores y personal de la Universidad Industrial de Santander por la excelente labor que realizan de educarnos y mejorar nuestra formación profesional para transformar nuestro país.*

*Agradecemos también a nuestros compañeros de clase, por haber establecido una sinergia excepcional, por ese sentido de hermandad y siempre colaborar en lo que estuviera a su alcance.*

*Adicionalmente, agradecemos a María Gutiérrez De Piñeres, por su colaboración continua, su orientación y recomendaciones las cuales ayudaron a culminar este proyecto.*

*Finalmente agradecemos a nuestro director de tesis Pedro Díaz Guerrero, quien con su conocimiento, amplia trayectoria y motivación nos orientó con asertividad en este proyecto.*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1 Descripción del problema.....	14
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivos Generales: .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos:.....	17
1.3 Justificación del plan propuesto.....	18
1.4 Marco teórico.....	19
1.4.1 Estrategias de mantenimiento.....	19
1.4.2 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) .....	22
1.4.3 Logros alcanzados con la aplicación del RCM.....	24
1.4.4 Taladro MD 6250.....	27
1.4.5 Sistema neumático.....	28
2. METODOLOGÍA .....	30
2.1 Función.....	30
2.1.1 Definición de condiciones de operación y caracterización técnica.....	30
2.1.2 Taxonomía y definición de fronteras e interfaces del taladro MD6250.....	32
2.1.3 Definición de funciones:.....	35
2.2 Fallas funcionales.....	36
2.3 Modos de falla.....	38
2.4 Análisis de efectos.....	42
2.5 Análisis de criticidad (Riesgo):.....	48
2.6 Definir el plan de actividades de mantenimiento:.....	50

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....56  
BIBLIOGRAFÍA.....59

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Apartes ficha técnica taladro Cat MD6250. (Caterpillar Inc., 2018).....	31
<b>Tabla 2.</b> Resumen condiciones de operación y características técnicas.....	32
<b>Tabla 3.</b> Señales de entrada y salida del sistema neumático del taladro MD6250.....	34
<b>Tabla 4.</b> Componentes del sistema neumático del taladro MD6250.....	35
<b>Tabla 5.</b> Definición de funciones primarias y secundarias.....	36
<b>Tabla 6.</b> Listado de fallas funcionales.....	37
<b>Tabla 7.</b> Modos de falla para la falla funcional 1 de la función principal 1.....	39
<b>Tabla 8.</b> Modos de falla para las fallas funcionales secundarias.....	40
<b>Tabla 9.</b> Descripción de efectos para modos de falla que causan falla funcional principal.....	43
<b>Tabla 10.</b> Descripción de efectos para modos de falla que causan falla funcional principal.....	44
<b>Tabla 11.</b> Matriz de evaluación de riesgos.....	48
<b>Tabla 12.</b> Estrategia y definición de tareas de mantenimiento.....	52
<b>Tabla 13.</b> Estrategia y definición de tareas de mantenimiento.....	53
<b>Tabla 14.</b> Estrategia y definición de tareas de mantenimiento.....	51
<b>Tabla 15.</b> Relación entre tareas de mantenimiento y modos de falla que se previenen.....	542

## LISTADO DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Disponibilidad último semestre del año 2019 de la flota de taladros MD6250. Fuente AMT.....	15
<b>Gráfica 2.</b> KPIs último semestre de la flota de taladros MD6250. Fuente AMT. ...	15
<b>Gráfica 3.</b> Pareto de fallas de los sistemas de los taladros MD6250 en la mina Calenturitas.....	15
<b>Gráfica 4.</b> Pareto de sistemas por TTR de los sistemas que componen los taladros MD6250 en la mina Calenturitas.....	16

## LISTADO DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Taladro Caterpillar MD 6250. (Caterpillar Inc., 2018).....	27
<b>Ilustración 2.</b> Esquema sistema neumático taladro MD6250. (Caterpillar Inc., 2018).....	28
<b>Ilustración 3.</b> Esquema del sistema neumático del taladro MD6250 .....	33
<b>Ilustración 4.</b> Diagrama de decisión para definir estrategias de mantenimiento. (SAE-JA1012, 2002).....	51

## RESUMEN

**TITULO:** OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO ASOCIADA AL SISTEMA NEUMÁTICO DE LA FLOTA DE TALADROS CATERPILLAR MD6250 EN OPERACIÓN EN LA MINA CALENTURITAS BAJO LA METODOLOGÍA DE RCM\*

**AUTORES:** WERMAN DAVID ARAGÓN LÓPEZ\*\*, CESAR ANDRÉS ARQUEZ VILLANUEVA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** RCM, TALADRO CATERPILLAR MD6250, SISTEMA NEUMÁTICO, MINERÍA, CARBÓN.

### **DESCRIPCIÓN:**

La presente monografía plantea optimizar la estrategia de mantenimiento del sistema neumático del taladro Caterpillar MD6250 en la operación de extracción de carbón en una mina a cielo abierto bajo la metodología de RCM, con la finalidad de mejorar la disponibilidad de la flota de los taladros, disminuir los tiempos de reparaciones y su confiabilidad. Al ser los taladros un equipo vital en la operación minera, se hace necesario implementar una estrategia que mejore la disponibilidad de la flota, evitando los retrasos en la planeación de las voladuras en la mina, lo cual impacta los costos de mantenimiento y de producción.

Las actividades de mantenimiento preventivo y predictivo se incrementaron un 45% debido al análisis de los diferentes modos de fallas que pueden ocurrir con mayor probabilidad. Con esta estrategia de mantenimiento propuesta, se pretende disminuir un 65% la frecuencia de paradas inesperadas y prevenir paradas los modos de falla del compresor.

---

\* Monografía de grado.

\*\* Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en gerencia de mantenimiento.

Director: Pedro José Díaz Guerrero. Maestría en métodos numéricos aplicados al cálculo.

## ABSTRACT

**TITLE:** OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE STRATEGY ASSOCIATED WITH THE PNEUMATIC SYSTEM OF THE CATERPILLAR MD6250 DRILLS FLEET IN OPERATION AT THE CALENTURITAS MINE UNDER THE RCM METHODOLOGY\*

**AUTHOR:** WERMAN DAVID ARAGÓN LÓPEZ\*\*, CESAR ANDRÉS ARQUEZ VILLANUEVA\*\*.

**KEY WORDS:** RCM, CATERPILLAR MD6250 DRILL, PNEUMATIC SYSTEM, MINING COAL.

### DESCRIPTION:

This paper aims to optimize the maintenance strategy of the Caterpillar MD6250 pneumatic drill system in the coal mining operation in an open pit mine under the RCM methodology, in order to improve the availability of the drilling fleet, reduce repair times and raise their reliability. As drills are vital equipment in the mining operation, it is necessary to implement a strategy that improves fleet availability to avoid delays in the planning of mine blasts, which has a positive impact on maintenance and production costs.

Preventive and predictive maintenance activities were increased by 45% due to the analysis of the different modes of failures that can occur with greater probability. With this proposed maintenance strategy, it is intended to reduce by 65% the frequency of unexpected shutdowns and prevent unexpected compressor failure modes.

---

\* Degree Mongraph

\*\* School of Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization.

Director: Pedro José Díaz Guerrero. Master in numerical methods applied to calculus.

---

## INTRODUCCIÓN

Las empresas de extracción de carbón térmico en Colombia se han visto golpeados por los bajos precios en el mercado internacional, según datos de la UPME se cotiza a 37,17 USD/Ton a mediados del 2020, ante este panorama y con el fin de seguir siendo competitivas, dichas compañías han tenido que reinventarse y desarrollar nuevas estrategias con el fin minimizar los costos operativos, aumentar la disponibilidad de sus equipos y por ende aumentar las toneladas de carbón extraído.

En la flota de taladros Caterpillar MD6250, los cuales son unos equipos críticos en la realización de voladuras, actualmente se está realizando un plan de mantenimiento siguiendo las recomendaciones de la fábrica, estas siendo unas indicaciones genéricas que ellos establecen pero no teniendo presente el contexto operacional específico a la cual están sometidos estos equipos; este tipo de plan tiende a ser poco eficiente, generan sobrecostos y fallas imprevistas; por ende retrasos en el proceso de voladura.

Siguiendo la estrategia empresarial trazada de aumentar la disponibilidad de los equipos, es pertinente diseñar una nueva estrategia de mantenimiento de los equipos bajo la metodología de RCM, con el fin de optimizar los recursos, disminuir las paradas imprevistas y aumentar la disponibilidad de la flota de taladros Caterpillar MD6250.

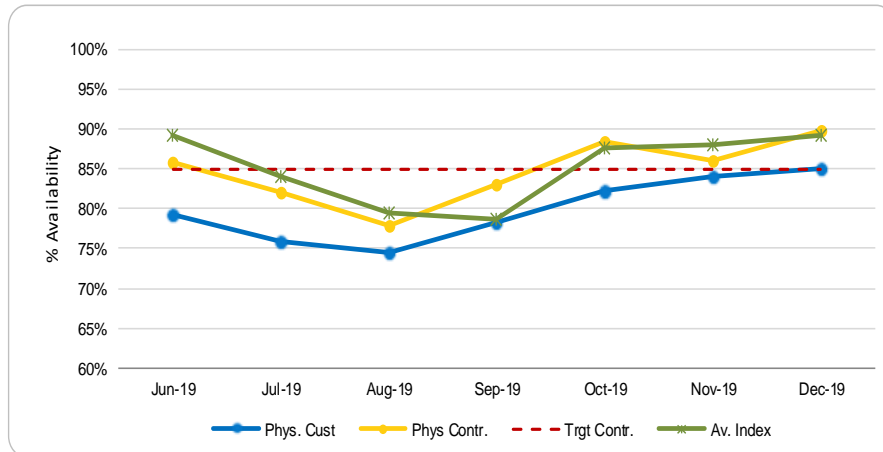
En el presente trabajo se pretende optimizar el plan de mantenimiento actual del sistema neumático de los taladros Caterpillar MD6250 siguiendo la metodología de RCM, teniendo en cuenta las condiciones operacionales y ambientales, haciendo un análisis funcional, un análisis de modos de fallas y efectos (FMEA), determinando la criticidad de los modos de fallas y proponiendo el nuevo plan de mantenimiento.

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

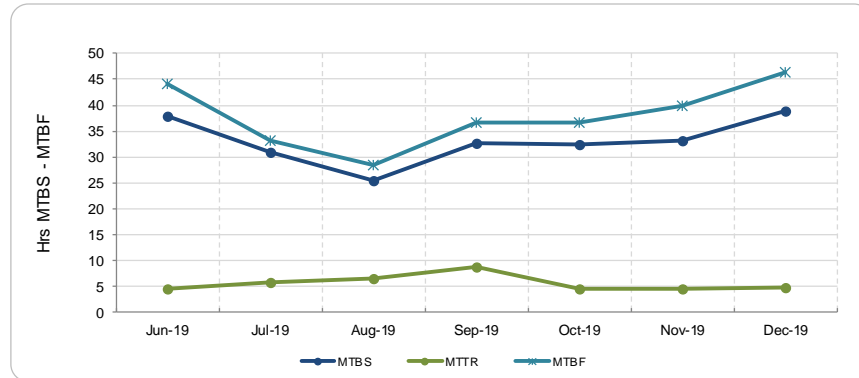
## 1.1 Descripción del problema.

A principios del año 2019, en la mina de carbón a cielo abierto Calenturitas, ubicada en el departamento del Cesar al norte de Colombia, propiedad de la compañía Prodeco, adquirió una nueva flota de taladros conformada por 6 equipos marca Caterpillar modelo MD6250, los cuales son los encargados de perforar los mantos de material estéril para exponer los mantos de carbón luego de un proceso de voladura. Para el año 2019 la disponibilidad esperada de la flota fue de 94,46% estimando un total de 3.084,54 horas fuera de servicio, sin embargo, la disponibilidad alcanzada por la flota fue de un 75,44% con un total de 17.111,43 horas fuera de servicio.

**Gráfica 1. Disponibilidad último semestre del año 2019 de la flota de taladros MD6250. Fuente AMT**

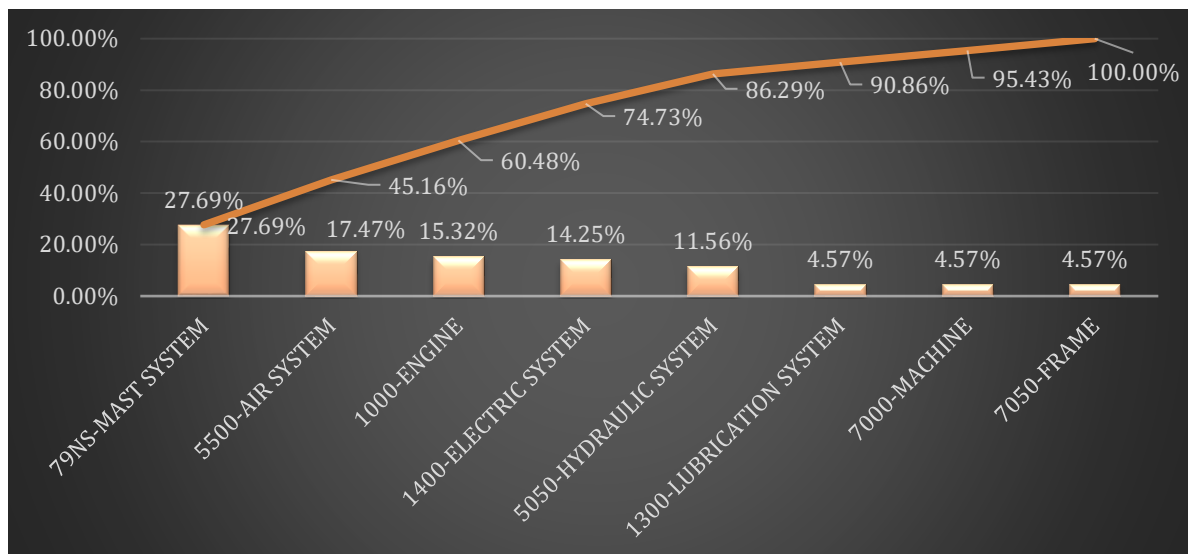


**Gráfica 2. KPIs último semestre de la flota de taladros MD6250. Fuente AMT.**

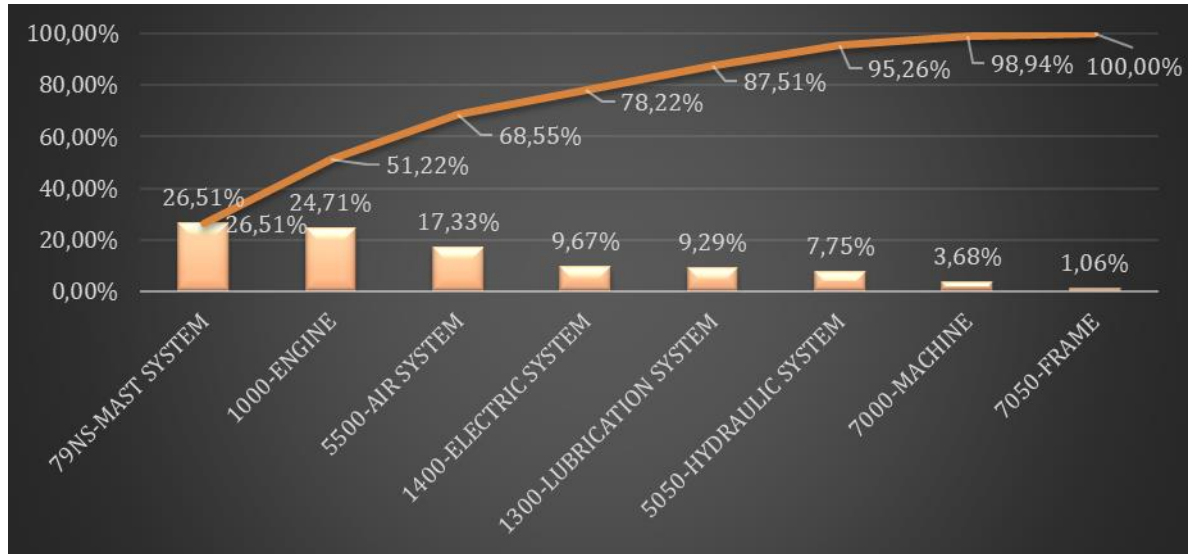


Adicionalmente, a lo largo del año 2019 la flota de taladros quedó fuera de servicio por paradas no programadas 20 veces a causa de problemas en el sistema neumático, empleando en total 2351,10 horas para su reparación en el año, siendo este sistema quien causó el 17,33% (Ver gráfica 4) del tiempo de reparación en el año 2019 y 17,47 % de detenciones (Ver gráfica 3).

**Gráfica 3. Pareto de fallas de los sistemas de los taladros MD6250 en la mina Calenturitas.**



**Gráfica 4. Pareto de sistemas por TTR de los sistemas que componen los taladros MD6250 en la mina Calenturitas.**



Otra variable que incrementa la criticidad del sistema neumático en los taladros MD6250, es que cuando muchos de sus componentes fallan no pueden ser reparados en sitio ni en taller, puesto que no se cuenta con las guías y especificaciones de reparación de estos elementos y su estrategia de mantenimiento consiste en que deben ser reemplazados cada vez que se presente algún avería en sus mecanismos, coyuntura que obliga a garantizar una alta confiabilidad de los componentes principales y de mayor costo adquisitivo como lo son: el compresor, tanque de almacenamiento y grupo de válvulas principales.

Por otro lado, los planes de mantenimiento que se ejecutan para la nueva flota de taladros se basan esencialmente en las recomendaciones del fabricante, las cuales son generales y no están diseñados para prevenir sistémicamente los modos de fallas que pueden causar un mayor impacto en el rendimiento de los equipos de la flota según su contexto operacional.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivos Generales:**

Optimizar la estrategia de mantenimiento del sistema neumático de la flota de taladros Caterpillar MD6250 ubicados en la mina Calenturitas, teniendo en cuenta los lineamientos de la metodología *mantenimiento centrado en confiabilidad* RCM.

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

- Identificar y determinar las condiciones de operación técnicas y ambientales en las cuales se encuentran los equipos trabajando, así como los niveles de producción esperados para la flota.
- Realizar un análisis funcional del sistema neumático, delimitando las fronteras del sistema que permita determinar los componentes objeto de estudio.
- Desarrollar metodología de análisis y modos de falla aplicado al sistema neumático.
- Analizar y determinar el grado de criticidad de los modos de fallas del sistema neumático de los equipos analizados, considerando los efectos de cada modo de falla.
- Proponer y actualizar actividades de mantenimiento del sistema neumático de la flota de taladros MD6250, teniendo en cuenta el plan de mantenimiento actual y el resultado de criticidad de los modos de fallas identificados.

### **1.3 Justificación del plan propuesto.**

El proceso de extracción del carbón en una mina a cielo abierto inicia con el proceso de perforación de los mantos de estéril, posterior a una etapa de exploración y planeación donde se determina la ubicación y distribución de los mantos de carbón y la planificación de la extracción del mineral. Es por esto que la disponibilidad de la flota juega un rol importante en el cumplimiento de las metas de producción (extracción de carbón).

Así mismo, la administración del mantenimiento de la flota de taladros adquirida por la empresa minera se encuentra a cargo del distribuidor representante de la marca en el país bajo un contrato MARC en el cual los cumplimientos de disponibilidad representan un porcentaje de las utilidades de la empresa administradora del mantenimiento de la flota.

Para cumplir el plan de producción estimado por la compañía minera, cada taladro de la flota tiene como objetivo perforar aproximadamente 90 mts lineales por hora con el fin de que se remueva alrededor de 6.500 ton/hr de material estéril para que se descubra la manta de carbón y así poder cumplir con las metas de extracción del mineral de 1.500.000 ton/mes.

Teniendo presente lo anterior, establecer estrategias de mantenimiento que garanticen los cumplimientos de disponibilidad de los nuevos taladros posibilitará el aumento de las utilidades por parte de la empresa a cargo del contrato Marc de los taladros y así mismo el cumplimiento de los objetivos de producción de la empresa minera, la cual ha pronosticado la venta/producción de 15 millones de toneladas para el presente año.

## 1.4 Marco teórico.

**1.4.1 Estrategias de mantenimiento.** Para entender el concepto de mantenimiento, inicialmente debe interpretarse adecuadamente lo referente a un sistema de producción, teniendo en cuenta que el mantenimiento es una de sus principales áreas de soporte. El objetivo principal de todo sistema de productivo (industria, comercio, servicio, etc) es agregar valor a un producto inicial a través de tres procesos básicos: transformación, transporte, almacenamiento o la combinación de los tres procesos, en los cuales se puede identificar la interacción de tres entes esenciales; las personas, el entorno y las máquinas. Dentro de este contexto de sistema productivo y considerando la demanda continua de bienes y servicios por parte de los consumidores surge la necesidad de preservar la operatividad de los equipos industriales mediante su construcción, reparación y/o mantenimiento con el fin de garantizar el abastecimiento o cumplimiento de la demanda de productos. Teniendo en cuenta lo anterior es posible entender el *mantenimiento* como toda actividad y/o gestión enfocada a sostener la funcionalidad de cualquier equipo y el buen estado de las máquinas y locaciones a través del tiempo, en donde al igual que un sistema productivo interactúan las personas (mantenedores), máquinas (artefactos) y entorno (sitios físicos donde se prestan los servicios de mantenimiento). (Mora, 2009).

Debido a las exigencias de producción que se enfrentan hoy en día todos los sistemas productivos, el continuo fortalecimiento, desarrollo y crecimiento entorno a una adecuada gestión de mantenimiento resalta la importancia de esta área en todas las industrias. Los sistemas de mantenimiento contribuyen al logro de metas económicas, al incrementar las utilidades y la satisfacción del cliente reduciendo al mínimo el tiempo muerto de la planta, optimizando la calidad, aumentando los niveles de producción y cumpliendo los tiempos de entrega a los clientes. Sin embargo, los alcances de una adecuada gestión de mantenimiento no se limitan solo al ámbito económico, sino también de seguridad industrial, ambiental y social, pues hoy en día no es suficiente solo con que los equipos funcionen

adecuadamente, sino que deben cumplir estándares medio ambientales y con riesgos de impacto mínimo para las personas con las cuales interactúa y el entorno en el que se encuentra. (Salih O. Duffuaa, 1995).

Actualmente las actividades de mantenimiento son reconocidas de acuerdo con varias condiciones, bien sean según el momento o estado de la máquina, estado de los componentes y/o recursos utilizados en las labores, sin embargo, estas actividades pueden ser relacionadas bajo 4 grupos; actividades de mantenimiento reactivas, preventivas, predictivas o proactivas.(Mora, 2009)

El ***mantenimiento reactivo o correctivo*** es reconocido principalmente porque su objetivo principal busca el reacondicionamiento de las funciones operacionales de la máquina en el menor tiempo posible, tras una falla inesperada o pérdida de parcial de sus capacidades, dado esto se pueden considerar de corto plazo de ejecución y sin planificación previa. Este tipo de reparaciones no son deseadas dentro de un sistema productivo y es uno de los principales objetivos de un eficiente sistema de gestión de activos, disminuir la probabilidad de ocurrencias de fallas inesperadas en las máquinas. El principal inconveniente que presenta este tipo de acción de mantenimiento consiste en que el usuario detecta la falla cuando el equipo se encuentra en servicio, en el preciso momento en que pierde su funcionalidad, ya sea al ponerlo en marcha o durante su utilización, lo cual afecta los índices de productividad, y eficiencia de la máquina. Entre algunos de los síntomas que determinan la presencia de fallas, pueden estar altos niveles de temperatura, presión o ruidos, fracturas de componentes, fugas de fluidos, y/o anomalías que pueden generar otros daños mayores. (Navarro Elola, Pastor, & Mugaburu Lacabrera, 1997).

El ***mantenimiento preventivo*** consiste en la ejecución de actividades periódicas y programadas sobre un sistema, equipo y/o máquinas. El objetivo de este tipo de actividades es realizar el cambio o reajuste de componentes de acuerdo con un parámetro de medición que indique que ha llegado hasta un estado de desgaste

permisible o aceptable. Este parámetro de aceptabilidad se construye de acuerdo con análisis estadísticos de frecuencias de fallas, dictaminados por los fabricantes y/o los usuarios de la máquina. Los parámetros de medición usados con mayor frecuencia para especificar el momento adecuado de realizar una reparación, reconstrucción o ajuste, se realiza en términos de horas de servicio, nivel de desgaste, unidades producidas, velocidades alcanzadas, consumo, valor de alguna variable de condición, etc. Posteriormente y una vez conocida la cifra previa del parámetro, se programa y se realiza la acción preventiva, antes de que alcance la condición fuera del estándar. Esta estrategia de mantenimiento busca principalmente evitar que los equipos fallen inesperadamente, mejorando los niveles de disponibilidad. (Patton, 1995).

La base del ***mantenimiento predictivo*** radica en el análisis y estudio de la evolución temporal de ciertos parámetros con el objetivo de predecir o determinar el momento de una posible falla funcional y de esta forma planificar todas las actividades pertinentes con suficiente antelación para que la avería no genere consecuencias de alto impacto o se presente de forma repentina. Una ventaja del mantenimiento predictivo es que extiende la vida útil de los componentes a diferencia de las actividades de mantenimiento preventivo, las cuales se realizan independientemente del estado en que se encuentren las partes. Es aquí donde toma relevancia la revisión y el estudio permanente de las variables internas o externas, asociadas al proceso de operación de una máquina, ya que permiten diagnosticar el estado actual y pronosticar el momento de aparición de una condición subestándar o de falla. (Mora, 2009).

Por último, el ***mantenimiento proactivo*** es aquel cuyas actividades se encuentran enfocadas a la detección y corrección de las condiciones que generan un desgaste prematuro y conllevan a la falla de los equipos. En términos de Alberto Mora, el proactivo se define como *“la metodología en la cual el diagnóstico y las tecnologías de orden predictivo son empleados para lograr aumentos*

*significativos de la vida de los equipos y disminuir las tareas de mantenimiento, con el fin de erradicar o de controlar las causas de fallas de las maquinas".* Las ventajas del mantenimiento proactivo se basan en que se busca localizar y modificar una condición antes de que se presenten los síntomas previos a una falla funcional, evitando como consecuencia grandes costos de inversión en mantenimiento y/o reposición de equipos. (Mora, 2009).

**1.4.2 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).** La metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) analiza las funciones y modos de fallas de un sistema e identifica las consecuencias de estas fallas para implementar medidas preventivas utilizando un procedimiento estandarizado de resolución lógica. RCM es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para garantizar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios desean que haga en su contexto operativo actual (Moubray, 1997).

Además, crea estándares para la continuidad de la función en el proceso de fabricación del equipo y el rendimiento esperado del equipo. Este proceso examina las pérdidas de función, los modos de falla, las frecuencias de los modos de falla y los efectos de estos modos de falla. También establece planes de trabajo para evitar pérdidas y modos de falla antes de que sucedan, y establece equipos responsables. El proceso de toma de decisiones en RCM mejora el sistema de gestión de mantenimiento al definir los pasos del trabajo a realizar en el mantenimiento del equipo, determinar los períodos de los pasos del trabajo y las piezas de repuesto que se utilizarán. Sin embargo, permite decidir si el equipo es conveniente para el proceso y determina los cambios de diseño en las necesidades del equipo para una nueva inversión y conveniencia de procesamiento. Al desarrollar todas estas normas, prioriza los impactos ambientales y la seguridad laboral. (Yavuz, 2019)

La aplicación de la técnica de mantenimiento RCM es óptima, ya que el método se utiliza para determinar qué se debe hacer para garantizar que una máquina o sistema continúe realizando sus tareas. Además de cumplir con las

especificaciones de la norma SAE JA 1011. Con esta metodología es posible asegurar que los elementos físicos continúen preservando la confiabilidad que ellos mismos poseen de su diseño, fabricación y prueba, a través de la realización de reparaciones en el momento más oportuno para evitar fallas menores que produzcan problemas más graves (Scarf, 2010). Para garantizar que los equipos e instalaciones operen en un estado activo es necesario desarrollar un plan de mantenimiento que incluya tareas de mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y proactivo; y que se aplican de acuerdo con la criticidad de cada componente (Zhong, 2011) y ajustando las tareas en todo momento a los objetivos de producción establecidos, optimizando la seguridad y la preservación del medio ambiente (Yang, 2010).

En este contexto, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) surgió en la industria de las aerolíneas en la década de 1960 como una metodología capaz de determinar la estrategia de mantenimiento óptima, disminuyendo las tareas de mantenimiento y los costes concernientes sin perturbar la eficiencia de la planta, la calidad del producto, la seguridad o la integridad ambiental. (Deshpande & Modak, 2002)

En muchos entornos de fabricación, la condición del equipo o proceso tiene un impacto significativo en la cantidad y calidad de las unidades producidas (Kazaz, 2013). La metodología RCM surge en este escenario proporcionando un marco capaz de reducir las actividades de mantenimiento y sus costos relacionados en la medida de lo posible sin afectar el rendimiento general de la planta, la calidad del producto, la seguridad o la integridad ambiental. (Deshpande & Modak, 2002)

Considerando lo anterior se hace necesario cumplir con los criterios mínimos para aplicar la metodología de RCM, los cuales se definen básicamente en tres normas técnicas:

1. IEC 60300-3-11: Suministra las pautas adecuadas para el desarrollo de políticas de gestión de fallos en instalaciones y estructuras mediante la

utilización de las técnicas de análisis del mantenimiento centrado en confiabilidad.

2. SAE-JA1011: Esta norma establece los criterios de evaluación para realizar correctamente el proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).
3. SAE-JA1012: Esta norma clarifica y amplía la información relevante de cada uno de los criterios listados en la SAE-JA1011, además resume cuestiones adicionales que deben abordarse para aplicar el RCM con éxito. Las secciones 5 a 14, 16 y 17 de esta guía reflejan los puntos principales de SAE JA1011. La Sección 15 explica con más detalle cómo los elementos clave del proceso RCM pueden combinarse para seleccionar políticas apropiadas para analizar los modos de fallas individuales, efectos y consecuencias. La Sección 18 aborda cuestiones de gestión y recursos esenciales para el desempeño exitoso de RCM.

**1.4.3 Logros alcanzados con la aplicación del RCM.** El mantenimiento industrial tiene dos objetivos esenciales: primero, una alta disponibilidad de equipos de producción; segundo, bajos costos de mantenimiento (Kari, 2002). Teniendo presente esto, se mencionará algunos de los resultados alcanzados al implementar RCM en diferentes industrias:

- El concepto de RCM se aplicó a la industria de la energía nuclear comercial de EE. UU. A principios de la década de 1980 y los ahorros generales estuvieron en el rango de reducción del 30-40% en mano de obra de mantenimiento y costos de materiales (Kuehn,1992)
- Utilizar la metodología de RCM aumentó en 5% el OEE (Eficacia global de equipos productivos) en una maquina empacadora en el sector de alimentos. (Yavuz et al., 2019)

- En United Airlines se realizó en una de sus bombas hidráulicas y los intervalos de overhaul pasaron de ser cada 6.000 horas hasta extenderse a 14,000 horas. (Smith & Hinchcliffe, 2004b)
- En SWBS en el proceso de análisis de sistemas, el analista descubrió que la última revisión de los planos del sistema contenía un cambio en el número de modelo para uno de los componentes del sistema. Esto condujo a una investigación para verificar qué número de modelo debería usarse en el análisis. La respuesta final confirmó que el nuevo modelo era correcto, pero también reveló que varios repuestos para el antiguo número de modelo habían sido retenidos por error durante unos cuatro años a un costo estimado de \$75,000 para cubrir impuestos, almacenamiento y gastos administrativos, antes del programa RCM desencadenó las acciones necesarias para deshacerse de los repuestos inútiles. (Smith & Hinchcliffe, 2004b)
- En Three Mile Island, una planta de energía nuclear, hubo reducciones significativas en el número de fallas en los equipos, este pasó de ser de 950 en 1990 hasta disminuir a 600 a mediados de 1993, es decir, una reducción del 37 por ciento. En algunos componentes se extendió los intervalos de mantenimiento preventivo, disminuyendo en 7.669 las horas hombre por año y ahorrando unos \$268,415 dólares por año. (Smith & Hinchcliffe, 2004a)
- En una planta de generación de energía en Tennessee se analizó el sistema de suministro de agua cruda, en el cual los resultados de RCM afectaron significativamente al 51 por ciento de las tareas de PM originales, arrojando evidencia creíble de que el programa de PM que se utilizó inicialmente como base era muy exagerado, posiblemente hasta tres veces; RCM proporcionó una estimación mucho más realista con la cual trabajar. Además, se identificó la necesidad de una fuente redundante de agua cruda para eliminar una serie de escenarios de fallas plausibles (incluyendo una falla potencial del suministro de la fuente principal de agua). Este suministro

de agua redundante se instaló para extraer agua de la esclusa de cenizas de la central eléctrica. Hasta la fecha, este sistema de suministro de agua de reserva se ha utilizado dos veces y el depurador nunca ha sido la causa de un corte de energía.(Smith & Hinchcliffe, 2004a).

- En la corporación Georgia-Pacific, en la operación de pulpa en Leaf River, se aplicó la metodología en el sistema de secado, determinando que se debe realizar un cambio en el 68% del programa de PM actual. En el RCM se propuso 99 tareas asociadas con modos de falla que actualmente no tenían actividad de mantenimiento asignada. Se incrementó el número de tareas del mantenimiento preventivo, pasando de ser de 77 con el plan actual a 175 tareas con las mejoras del RCM. Se midieron los resultados de la implementación durante el último trimestre de 2000 y el primer trimestre de 2001 y se comparó con los mismos trimestres del año anterior; determinando que en el subsistema Cutter Layboy el tiempo de inactividad se redujo en un 42%. En el Sistema de secado hubo una reducción del 52% en el tiempo de inactividad y una disminución del 37% en el costo del mantenimiento. (Smith & Hinchcliffe, 2004a).
- En la NASA se aplicó el RCM a un túnel de viento de 12 ft de presión (PWT). La metodología introdujo un cambio al 77 por ciento del programa de PM actual.Los costos de mantenimiento correctivo (CM) se redujeron drásticamente en el rango de 40 a 60 %. El análisis identificó claramente los modos de fallacríticos (efectos de seguridad e interrupción); así las decisiones de la tarea de PM se centraron en estos modos de falla. La disminución del mantenimiento correctivo ha sido beneficioso para reducir el tiempo de inactividad no programado (costo del tiempo de inactividad estimado en \$ 4000 dólares por hora)(Smith & Hinchcliffe, 2004a).

**1.4.4 Taladro MD 6250.** Los taladros MD 6250 son equipos diseñados por la compañía Caterpillar con el fin de perforar la superficie de la tierra y formar agujeros (barrenos) de entre 150 mm hasta 250 mm de diámetro con una capacidad de carga hasta 32.655 kg fuerza. Dichas máquinas pueden realizar perforaciones en un paso o múltiples pasos, alcanzando profundidades de perforación de hasta 53,6 mts y en 2 modalidades, tipo martillo o tipo broca, dependiendo de la dureza de la superficie. (Mining Magazine, 2017).

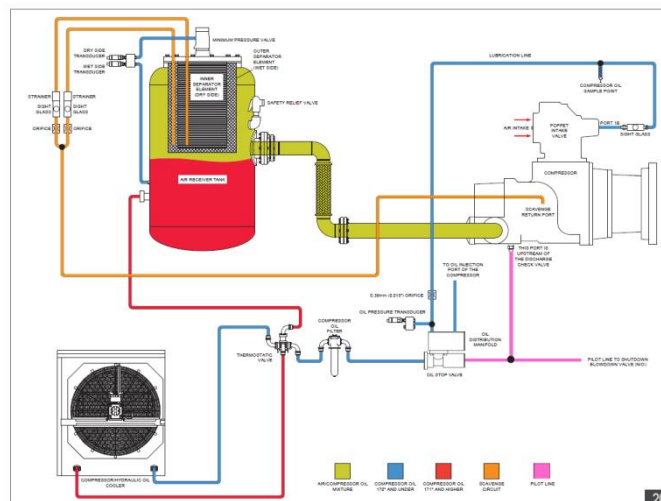
***Ilustración 1. Taladro Caterpillar MD 6250. (Caterpillar Inc., 2018)***



Los taladros MD 6250 son accionados por un motor diésel Caterpillar Acert C27, el cual es el encargado de suministrar la energía principalmente a los sistemas hidráulicos y neumático del taladro, los cuales se encargarán posteriormente de controlar las funciones principales, secundarias y auxiliares del equipo. Los sistemas más importantes que conforman este tipo de maquinarias son: hidráulico, neumático, eléctrico, de lubricación, estructural, de perforación y de accionamiento.

**1.4.5 Sistema neumático.** El objetivo principal del sistema neumático de los taladros MD6250 es suministrar aire a alta presión a las brocas de perforación con la finalidad de enfriar la broca y expulsar los pedazos de rocas “cortados” a la superficie externa. Este sistema está compuesto principalmente por un compresor de desplazamiento positivo tipo tornillo de volumen variable de máximo 2000 CFM a 125 psi, accionado por un motor diésel C27 Acert de 879 HP a 1800 rpm. Así mismo, cuenta con un tanque de alta presión, enfriador de aceite y el grupo de válvulas de control, tal como lo pueden observar en la siguiente ilustración.

**Ilustración 2. Esquema sistema neumático taladro MD6250. (Caterpillar Inc., 2018)**



El anterior esquema también representa el circuito del flujo del aire y aceite del sistema neumático. La mezcla de aire y aceite sale por la válvula de cheque de descarga del compresor hacia el tanque de almacenamiento de alta presión, en este componente el aire y el aceite son separados por 2 filtros, los cuales deben permitir el paso de 6 ppm de aceite que fluye en la mezcla aire/aceite (aprox. 16 litros por hora), el aceite decantado cae al fondo del tanque impulsado entonces por la presión del aire. Cuando el aceite se encuentra por debajo de los 77°C, es enviado directamente hacia el compresor y cuando se encuentra por encima, la

válvula termostática se abre proporcionalmente, direccionando una parte del flujo de aceite hacia el enfriador y finalmente hasta el compresor nuevamente. La capacidad de caída de temperatura del enfriador es de 10°C. Por su parte el aire a alta presión almacenado en el tanque es liberado hacia el grupo de válvulas de control y posteriormente a la broca, cuando se alcanza una presión mínima de 120 psi y se alivia cuando supera 150 psi de presión.

## **2. METODOLOGÍA**

Con el propósito de llevar a cabo los objetivos planteados, se realiza la optimización de la estrategia de mantenimiento asociada al sistema neumático de la flota de taladros Caterpillar MD6250 en operación en la mina Calenturitas basados en los criterios establecidos por las normas SAE JA-1011 y SAE JA-1012, la cual se desarrollará en los pasos siguientes:

### **2.1 Función.**

De acuerdo con la norma SAE JA-1011 el primer paso para desarrollar una estrategia de mantenimiento basado en confiabilidad es definir las funciones y el rendimiento esperado de acuerdo al contexto operacional y normatividades que regulen el comportamiento de la máquina. Para llegar a una definición completa y estructurada de las funciones realizaremos una caracterización técnica del sistema en estudio, así como la definición de su contexto operacional, posteriormente se define la frontera del sistema en estudio, delimitando los componentes que se analizarán y las señales de entrada y salida del sistema, esto nos permitirá identificar apropiadamente las funciones primarias y secundarias del sistema. (SAE JA1011, 1999).

**2.1.1 Definición de condiciones de operación y caracterización técnica.** Para definir una óptima estrategia de mantenimiento es necesario identificar las características técnicas del sistema en estudio, así como sus condiciones de operación.

Las características técnicas del sistema neumático de los taladros MD6250 en estudio se encuentran delimitadas por la capacidad del compresor de tornillo (desplazamiento positivo), capaz de entregar hasta 2000 CFM de aire comprimido

y el tanque de almacenamiento diseñado para contener una presión máxima nominal de 125 psi bajo los estándares ASME/CR N/AU, los cuales se pueden verificar en su ficha técnica mostrada a continuación.

**Tabla 1. Apartes ficha técnica taladro Cat MD6250. (Caterpillar Inc., 2018)**

Compressor Choices		Receiver Tank Choices	
DTH drilling	Includes tool lubrication system and hammer storage		
1350 cfm/500 psi	38.2 m <sup>3</sup> /min (1,350 ft <sup>3</sup> /min) @ 34.4 bar (500 psi) includes 113 L (30 gal) tool oiler		
1500 cfm/350 psi	42.2 m <sup>3</sup> /min (1,500 ft <sup>3</sup> /min) @ 24.1 bar (350 psi) includes 113 L (30 gal) tool oiler		
Rotary drilling	Optional tool lubrication system		
2000 cfm/125 psi	56.6 m <sup>3</sup> /min (2,000 ft <sup>3</sup> /min) @ 8.6 bar (125 psi)	• Low pressure 8.6 bar (125 psi) for ASME/CRN/AU or CE	• High pressure 24.1 or 34.4 bar (350 or 500 psi) for ASME/CRN/AU or CE

With the compressors variable volume control, the operator can limit air output and engine speed both resulting in reduced fuel consumption. All of these compressors contain this feature.

Compressor control box enclosure with purged air lines

El compresor del taladro MD6250 es accionado por un motor de combustión interna Cat C27 con capacidad de entrega de 875 HP a 1.800 rpm. Así mismo es importante que resaltar que el sistema neumático se encuentra en funcionamiento mientras el equipo se encuentra en modo perforación, aproximadamente un 75% del tiempo disponible del taladro, pues el tiempo restante lo emplea en traslado de un barreno a otro. Por otro lado, a los taladros se les realizan actividades de mantenimiento a cada uno de sus sistemas aproximadamente cada 250 horas de operación.

La productividad esperada de los taladros es de perforar la superficie 90 metros lineales por hora a la intemperie, en un entorno con alta polución de polvo, 24 horas al día y bajo temperatura ambiente, la cual oscila entre los 23°C y 40°C aproximadamente.

**Tabla 2. Resumen condiciones de operación y características técnicas.**

ELEMENTO DE ESTUDIO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ELEMENTO	CONDICIONES OPERACIONALES	CONDICIONES AMBIENTALES
Sistema neumático del taladro MD6250	Compresor de tornillo de desplazamiento positivo.	Sistema neumático accionado por un motor de combustión interna C27 con capacidad de entrega de 875 HP @ 1800 rpm.	Temperatura ambiente hasta 40°C.
	Flujo máximo de aire de 2000 CFM	Trabajo 75% del tiempo disponible del taladro, cuando el taladro se encuentra en modo perforación	Trabajo a la intemperie.
	Almacenamiento de aire hasta 125 psi.	Perforación de roca dura	Entorno con alta polución de polvo y carbón
	Presión máxima de trabajo 125 Psi	Trabaja las 24 horas del día los 7 días de la semana.	
	Temperatura máxima de mezcla aire-aceite de 121°C.	Se le realiza mantenimiento preventivo cada 250 horas.	

**2.1.2 Taxonomía y definición de fronteras e interfaces del taladro MD6250.** El esquema mostrado a continuación representa las fronteras del sistema en estudio, el cual comprende exclusivamente los componentes del sistema neumático. Así mismo se realiza un análisis de señales de entrada y salidas del sistema, con el fin de realizar un correcto análisis funcional e identificar las funciones primarias y secundarias. Las señales de entrada y salida pueden ser eléctricas, mecánicas, físicas, etc., las cuales se mencionan en la tabla 3.



**Tabla 3. Señales de entrada y salida del sistema neumático del taladro MD6250.**

<b>INTERFASES</b>	
<b>Entradas</b>	<b>Salidas</b>
Aire a presión atmosférica.	Aire a alta presión.
Energía del motor de combustión al compresor.	Calor del enfriador de aceite.
Energía a válvula solenoide normalmente abierta.	Fuga de aire.
Energía a válvula solenoide normalmente cerrada.	Fuga de aceite.
	Señal del sensor de temperatura de aceite de la válvula termostática.
	Señal de sensor de presión del aceite del compresor.
	Señal de sensor de presión de vacío del aire de entrada.
	Señal de transductor de temperatura de mezcla aire-aceite a la salida del compresor.
	Señal del sensor de presión del lado seco del tanque de almacenamiento.
	Señal del sensor de presión del lado húmedo del tanque de almacenamiento.

**Tabla 4. Componentes del sistema neumático del taladro MD6250.**

Componentes principales	Sensores	Filtros	Válvulas	
Compresor	Sensor de presión de aire de entrada	Filtro de aire primario	Válvula poppet	Válvula de apertura del poppet normalmente cerrada
Tanque de almacenamiento de aire	Transductor de temperatura salida de compresor	Filtro de aire secundario	Válvula de alivio del tanque	Válvula de apertura del poppet normalmente abierta
Enfriador de aceite	Transductor de presión lado humedo del tanque	Filtros Separadores de aire/aceite del tanque	Válvula de presión mínima del tanque	Válvula cheque de descarga del compresor de aire
	Transductor de presión lado seco del tanque	Filtro de aceite	Válvula termostática de bypass aceite	Válvula reguladora de presión del compresor (espiral)
	Sensor de temperatura de la valvula termostática	Separador de agua	Válvula oil-stop	Valvula espiral
	Transductor de presión del aceite a la salida del manifold		Válvula de bola de suministro de aire a la broca	Válvula principal de aire
			Válvula shutdown	Válvula running

**2.1.3 Definición de funciones.** Una vez definida la frontera del sistema en estudio, los componentes que lo conforman, las entradas y salidas del sistema, es posible identificar las funciones primarias y secundarias a cargo de cada uno de los elementos que componen al sistema neumático, teniendo en cuenta los datos técnicos, el contexto operacional, estándar de funcionamiento, las condiciones ambientales, los riesgos de seguridad, los ciclos de trabajo y la disponibilidad exigida, las cuales mencionamos a continuación.

**Tabla 5. Definición de funciones primarias y secundarias.**

INTERFASES (Entradas/Salidas)	Cód Fun.	FUNCIONES	INTERFASES (Entradas/Salidas)	Cód Fun.	FUNCIONES
(E) Aire a presión atmosférica.	1P	Suministrar flujo hasta 2000 CFM a la broca a mínimo 80 psi.	(S) Señal de sensor de presión del aceite del compresor.	7S	Enviar señal de presión del aceite del sistema.
(S) Aire a alta presión.	1S	Liberar aire comprimido que se encuentre por encima de 150 psi.	(S) Señal de sensor de presión de vacío del aire de entrada.	8S	Enviar señal de presión de vacío del aire al interior del manifold de admisión de aire en un rango 5 +/- 0,25 VDC.
(E) Energía del motor de combustión al compresor.	2S	Recibir energía mecánica proveniente del motor de combustión interna.	(S) Señal de transductor de temperatura de mezcla aire-aceite a la salida del compresor.	9S	Enviar señal de temperatura de la mezcla aire-aceite en un rango de 15°C a 150°C.
(S) Calor del enfriador de aceite.	3S	Mantener temperatura de la mezcla aire-aceite por debajo de 121°C	(S) Señal del sensor de presión del lado seco del tanque de almacenamiento.	10S	Enviar señal de presión del lado seco del tanque en un rango 5 +/- 0,25 VDC.
(S) Fuga de aire.	4S	Contener aire comprimido al interior de los componentes del sistema neumático.	(S) Señal del sensor de presión del lado húmedo del tanque de almacenamiento.	11S	Enviar señal de presión del lado húmedo del tanque en un rango 5 +/- 0,25 VDC.
(S) Fuga de aceite.	5S	Contener aceite dentro de los componentes del sistema neumático.	(E) Energía a válvula solenoide normalmente abierta.	12S	Recibir energía eléctrica a válvula normalmente abierta.
(S) Señal del sensor de temperatura de aceite de la válvula termostática.	6S	Mantener presión de aceite en rango operativo.	(E) Energía a válvula solenoide normalmente cerrada.	13S	Recibir energía eléctrica a válvula normalmente cerrada.

## 2.2 Fallas funcionales.

De acuerdo a la norma SAE JA-1011, la falla funcional es un estado en el cual se encuentra el sistema o activo, que no le permite realizar una función específica con un nivel de desempeño deseado. (SAE JA1011, 1999).

A continuación, se muestra el listado de las fallas razonablemente probable que pueden causar la pérdida parcial, total o de funcionamiento erróneo de las funciones definidas.

**Tabla 6. Listado de fallas funcionales.**

<b>Cód. Func.</b>	<b>Función</b>	<b>Cód. FF</b>	<b>Descripción Falla Funcional</b>
1P	Suministrar flujo hasta 2000 CFM a la broca a mínimo 80 psi.	1PFF1	No suministra flujo de aire suficiente.
1S	Liberar aire comprimido que se encuentre por encima de 150 psi.	1SFF1	No libera aire comprimido por encima de 150 psi.
2S	Recibir energía mecánica proveniente del motor de combustión interna.	2SFF1	No recibe energía mecánica proveniente del motor de combustión interna.
3S	Mantener temperatura de la mezcla aire-aceite por debajo de 121°C	3SFF1	No mantiene la temperatura de la mezcla aire-aceite por debajo de 121 °C.
4S	Contener aire comprimido al interior de los componentes del sistema neumático.	4SFF1	No contiene aire comprimido al interior de los componentes del sistema neumático.
5S	Contener aceite dentro de los componentes del sistema neumático.	5SFF1	No contiene aceite dentro de los componentes del sistema neumático.
6S	Mantener presión de aceite en rango operativo.	6SFF1	No mantiene la presión del aceite en rango operativo.
7S	Enviar señal de presión del aceite del sistema.	7SFF1	No envía señal adecuada de presión de aceite del sistema.
8S	Enviar señal de presión de vacío del aire al interior del manifold de admisión de aire en un rango 5 +/- 0,25 VDC.	8SFF1	No envía señal de presión de vacío del aire al interior del manifold de admisión de aire en un rango de 5 +/- 0,25 VDC.
9S	Enviar señal de temperatura de la mezcla aire-aceite en un rango de 15°C a 150°C.	9SFF1	No envía señal de temperatura de la mezcla aire-aceite en un rango de 15°C a 150°C
10S	Enviar señal de presión del lado seco del tanque en un rango 5 +/- 0,25 VDC.	10SFF1	No envía señal de presión del lado seco del tanque en un rango de 5 +/- 0,25 VDC.
11S	Enviar señal de presión del lado húmedo del tanque en un rango 5 +/- 0,25 VDC.	11SFF1	No envía señal de presión del lado húmedo del tanque en un rango de 5 +/- 0,25 VDC.
12S	Recibir energía eléctrica a válvula normalmente abierta.	12SFF1	No recibe energía eléctrica a válvula normalmente abierta.
13S	Recibir energía eléctrica a válvula normalmente cerrada.	13SFF1	No recibe energía eléctrica a válvula normalmente cerrada.

### **2.3 Modos de falla.**

Los modos de falla son eventos simples que causan una falla funcional en el sistema.(SAE JA1011, 1999). A continuación, se analizan y listan los eventos que causan la falla funcional o hechos que de manera razonablemente posible pueden haber causado cada estado de falla, teniendo en cuenta los mecanismos que pudieron haber causado la falla(deterioro, operación, diseño inadecuado,problemas de fabricación, etc.).

**Tabla 7. Modos de falla para la falla funcional 1 de la función principal.**

CÓDIGO DE FALLAS FUNCIONALES.										
1PFF1										
DESCRIPCIÓN DE MODOS DE FALLAS	Fractura del eje de entrada al compresor por corrosión.	Fisura del acople de caucho entre el buje del eje de entrada del compresor y la brida de acople a la volanta por sobrecarga por falla de la válvula running blowdown.	Amarres plasticos de filtros de aire partidos.	Sensor de presión de vacío descalibrado (terminal aterrizada).	Cableado de solenoide NO roto.	Aislamiento interno del solenoide NC.	Desprendimiento de material en los ejes rotores por lubricación inadecuada.	Valvula poppet con taponamiento en los puertos 1A, 1B, 2 y 3.	Descalibración de la válvula de alivio (por debajo de presión de válvula mínima).	Fuga de aceite por grañado de mangueras.
	1PFF1MF1	1PFF1MF7	1PFF1MF13	1PFF1MF19	1PFF1MF25	1PFF1MF31	1PFF1MF37	1PFF1MF43	1PFF1MF49	1PFF1MF55
	Fractura del eje de entrada al compresor por fatiga.	Válvula espiral se mantiene totalmente abierta.	Cups evacuadores de polvo taponados o en mal estado.	Sensor de presión de vacío descalibrado fuera de rango ET.	Corto circuito por resistencia alta del solenoide NO.	Vibración excesiva en los rodamientos de los ejes rotores por lubricación inadecuada.	Desprendimiento de material en los ejes rotores por corrosión.	Válvula de bola de la broca atascada.	Valvula de alivio del tanque de aire pegada.	Descalibración de la válvula de presión mínima.
	1PFF1MF2	1PFF1MF8	1PFF1MF14	1PFF1MF20	1PFF1MF26	1PFF1MF32	1PFF1MF38	1PFF1MF44	1PFF1MF50	1PFF1MF56
	Fractura del eje de entrada al compresor por deformación.	Válvula de shutdown pegada.	Filtros separadores aire/aceite en tanque de almacenamiento taponados.	Sensor de presión de vacío abierto en corto.	Aislamiento interno del solenoide NO.	Vibración excesiva en los rodamientos de los ejes rotores por desalineación.	Deformación y atascamiento en los ejes rotores por sobrecarga por válvula de cheque de descarga pegada.	Sulfatación (aislamiento) de conectores de la electroválvula de bola de la broca.	Valvula de presión de mínima pegada.	Fuga de aire por las mangueras de la válvula de descarga del compresor por rozamiento
	1PFF1MF3	1PFF1MF9	1PFF1MF15	1PFF1MF21	1PFF1MF27	1PFF1MF33	1PFF1MF39	1PFF1MF45	1PFF1MF51	1PFF1MF57
	Fractura del eje de entrada al compresor por vibración.	Filtros de aire de entrada taponados.	Sensor de presión de vacío desajustado por vibración.	Aumento de resistencia (demasiados empalmes) en sensor de presión de vacío.	Sulfatación (aislamiento) de conectores del solenoide NC.	Vibración excesiva en los rodamientos de los ejes rotores por corrosión.	Deformación y atascamiento en los ejes rotores por sobrecarga por válvula running blowdown pegada.	Cableado de la electroválvula de bola de la broca roto.	Fuga de aceite por sello de instalación del compresor de aire.	Fuga de aire por las mangueras cristalizadas de la válvula de descarga del compresor
	1PFF1MF4	1PFF1MF10	1PFF1MF16	1PFF1MF22	1PFF1MF28	1PFF1MF34	1PFF1MF40	1PFF1MF46	1PFF1MF52	1PFF1MF58
	Soltura de tornillos que unen la brida del acople del compresor con la volanta del motor.	Presencia de agua en los filtros de aire.	Aislamiento eléctrico del harness del sensor de presión de vacío.	Fuga de aire por alto GAP entre housing y rotores por desgaste abrasivo por contaminación. (Leakage path)	Cableado de solenoide NC roto.	Vibración excesiva en los rodamientos de los ejes rotores por fatiga superficial.	Resortes internos de válvula poppet partidos.	Corto circuito por resistencia alta de la electroválvula de bola de la broca.	Fuga de aceite por rozamiento de mangueras.	Fuga de aire por las mangueras de la válvula de descarga del compresor presentan deformación por abultamiento o hinchazón (globos).
	1PFF1MF5	1PFF1MF11	1PFF1MF17	1PFF1MF23	1PFF1MF29	1PFF1MF35	1PFF1MF41	1PFF1MF47	1PFF1MF53	1PFF1MF59
Degradación del acople de caucho entre el buje del eje de entrada del compresor y la brida de acople a la volanta por tener contacto con aceite.	Caja de filtros de aire suelta.	Sulfatación (aislamiento) de conectores de sensor de presión de vacío.	Sulfatación (aislamiento) de conectores del solenoide NO.	Corto circuito por resistencia alta del solenoide NC.	Desprendimiento de material en los ejes rotores por contaminación ó erosión.	Válvula poppet con Atascamiento del spool por partículas (contaminación).	Aislamiento interno de la electroválvula de bola de la broca.	Fuga de aceite por sellos de acoples de las mangueras desgastados.		
1PFF1MF6	1PFF1MF12	1PFF1MF18	1PFF1MF24	1PFF1MF30	1PFF1MF36	1PFF1MF42	1PFF1MF48	1PFF1MF54		

**Tabla 8. Modos de falla para las fallas funcionales secundarias.**

CÓDIGO DE FALLAS FUNCIONALES.											
1SFF1	2SFF1	3SFF1			4SFF1			5SFF1	6SFF1		
Descalibración de la válvula de alivio.	Fractura del eje de entrada al compresor por corrosión.	Soltura de tornillos que unen la brida del acople del compresor con la volanta del motor.	Taponamiento del enfriador de aceite por suciedad.	Bloqueo de la válvula termostática por contaminación (no envía flujo al radiador).	Sobrecalentamiento de la mezcla aire-aceite en el compresor por corrosión de los rodamientos de los ejes rotores.	Bloqueo de la válvula termostática por fractura interna (no envía flujo al radiador).	Fuga de aire por sello de instalación del compresor de aire.	Fuga de aire por las mangueras cristalizadas de la válvula de descarga del compresor	Fuga de aceite por sello de instalación del compresor de aire.	Fuga de aire por sello de instalación del compresor de aire.	Fuga de aceite por sello de instalación del compresor de aire.
1SFF1MF1	2SFF1MF1	2SFF1MF5	3SFF1MF1	3SFF1MF7	3SFF1MF13	3SFF1MF19	4SFF1MF1	4SFF1MF5	5SFF1MF1	6SFF1MF1	6SFF1MF7
Válvula de alivio pegada.	Fractura del eje de entrada al compresor por fatiga.	Degradación del acople de caucho entre el buje de eje de entrada del compresor y la brida de acople a la volanta por tener contacto con aceite.	Ventilador con rodamientos internos frenados por falta de lubricación	Sueltas tuberías, líneas, abrazaderas, soportes.	Sobrecalentamiento de la mezcla aire-aceite en el compresor por fatiga superficial de los rodamientos de los ejes rotores.	Fuga de aceite por sellos de la Válvula termostática.	Fuga de aire por rozamiento de mangueras.	Fuga de aire por válvula shutdown pegada.	Fuga de aceite por rozamiento de mangueras.	Fuga de aire por válvula shutdown pegada.	Fuga de aceite por rozamiento de mangueras.
1SFF1MF2	2SFF1MF2	2SFF1MF6	3SFF1MF2	3SFF1MF8	3SFF1MF14	3SFF1MF20	4SFF1MF2	4SFF1MF6	5SFF1MF2	6SFF1MF2	6SFF1MF8
Válvula de alivio con spool atascado por contaminación.	Fractura del eje de entrada al compresor por deformación.	Fisura del acople de caucho entre el buje del eje de entrada del compresor y la brida de acople a la volanta por sobrecarga por falla de la válvula running blowdown.	Ventilador con fractura en los tornillos internos sujeción de hub	Descalibración de la válvula termostática.	Sobrecalentamiento de la mezcla aire-aceite en el compresor por desprendimiento de material en los ejes rotores por contaminación ó erosión.	Sobrecalentamiento de la mezcla aire-aceite en el compresor por desprendimiento de material en los ejes rotores por corrosión.	Fuga de aire por sellos de acoples de las mangueras desgastados.	Explosión de tanque de almacenamiento de aire por no aterrizar cargas eléctricas estáticas generadas por la fricción del aire con el metal.	Fuga de aceite por sellos de acoples de las mangueras desgastados.	Fuga de aire por rozamiento de mangueras.	Fuga de aceite por sellos de acoples de las mangueras desgastados.
1SFF1MF3	2SFF1MF3	2SFF1MF7	3SFF1MF3	3SFF1MF9	3SFF1MF15	3SFF1MF21	4SFF1MF3	4SFF1MF7	5SFF1MF3	6SFF1MF3	6SFF1MF9
Fractura del cuerpo de la válvula de alivio.	Fractura del eje de entrada al compresor por vibración.		Ventilador presenta vibración por desbalanceo	Sensor de temperatura a la entrada de válvula termostática envía señal errónea (no envía flujo suficiente al radiador).	Fuga de aceite por grafado de mangueras.	Fuga de aceite por sello de instalación del compresor de aire.	Fuga de aire por las mangueras de la válvula de descarga del compresor presentan deformación por abultamiento o hinchazón(globos)		Fuga de aceite por grafado de mangueras.	Fuga de aire por sellos de acoples de las mangueras desgastados.	Fuga de aceite por grafado de mangueras.
1SFF1MF4	2SFF1MF4		3SFF1MF4	3SFF1MF10	3SFF1MF16	3SFF1MF22	4SFF1MF4		5SFF1MF4	6SFF1MF4	6SFF1MF10
			Radiador fugando por módulos rotos.	Sobrecalentamiento de la mezcla aire-aceite en el compresor por lubricación inadecuada en los rodamientos de los ejes rotores	Sobrecalentamiento de la mezcla aire-aceite en el compresor por desprendimiento de material en los ejes rotores por lubricación inadecuada.	Fuga de aceite por rozamiento de mangueras.				Fuga de aire por las mangueras de la válvula de descarga del compresor presentan deformación por abultamiento o hinchazón(globos)	
			3SFF1MF5	3SFF1MF11	3SFF1MF17	3SFF1MF23				6SFF1MF5	
			Radiador con fractura por roce con el ventilador	Sobrecalentamiento de la mezcla aire-aceite en el compresor por desalineación de rodamientos de los ejes rotores .	Bloqueo de la válvula termostática por corrosión (no envía flujo al radiador).	Fuga de aceite por sellos de acoples de las mangueras desgastados.				Válvula oil-stop pegada.	
			3SFF1MF6	3SFF1MF12	3SFF1MF18	3SFF1MF24				6SFF1MF6	

DESCRIPCIÓN DE MODOS DE FALLAS

**Tabla 8. Modos de falla para las fallas funcionales secundarias.**

CÓDIGO DE FALLAS FUNCIONALES.												
	7SFF1	8SFF1	9SFF1	10SFF1	11SFF1	12SFF1	13SFF1					
DESCRIPCIÓN DE MODOS DE FALLAS	Sensor desajustado por vibración.	Sensor descalibrado fuera de rango ET.	Sensor desajustado por vibración.	Sensor descalibrado fuera de rango ET.	Sensor desajustado por vibración.	Sensor descalibrado fuera de rango ET.	Sensor desajustado por vibración.	Sensor descalibrado fuera de rango ET.	Sulfatación (aislamiento) de conectores del solenoide NO.	Sulfatación (aislamiento) de conectores del solenoide NC.		
	7SFF1MF1	7SFF1MF5	8SFF1MF1	8SFF1MF5	9SFF1MF1	9SFF1MF5	10SFF1MF1	10SFF1MF5	11SFF1MF1	11SFF1MF5	12SFF1MF1	13SFF1MF1
	Aislamiento eléctrico del harness del sensor.	Corto circuito (pisado o roce).	Aislamiento eléctrico del harness del sensor.	Corto circuito (pisado o roce).	Aislamiento eléctrico del harness del sensor.	Corto circuito (pisado o roce).	Aislamiento eléctrico del harness del sensor.	Corto circuito (pisado o roce).	Aislamiento eléctrico del harness del sensor.	Corto circuito (pisado o roce).	Cableado de solenoide NO roto.	Cableado de solenoide NC roto.
	7SFF1MF2	7SFF1MF6	8SFF1MF2	8SFF1MF6	9SFF1MF2	9SFF1MF6	10SFF1MF2	10SFF1MF6	11SFF1MF2	11SFF1MF6	12SFF1MF2	13SFF1MF2
	Sulfatación (aislamiento) de conectores.	Sensor abierto en corto.	Sulfatación (aislamiento) de conectores.	Sensor abierto en corto.	Sulfatación (aislamiento) de conectores.	Sensor abierto en corto.	Sulfatación (aislamiento) de conectores.	Sensor abierto en corto.	Sulfatación (aislamiento) de conectores.	Sensor abierto en corto.	Corto circuito por resistencia alta del solenoide NO.	Corto circuito por resistencia alta del solenoide NC.
	7SFF1MF3	7SFF1MF7	8SFF1MF3	8SFF1MF7	9SFF1MF3	9SFF1MF7	10SFF1MF3	10SFF1MF7	11SFF1MF3	11SFF1MF7	12SFF1MF3	13SFF1MF3
	Sensor descalibrado (terminal aterrizada).	Aumento de resistencia (demasiados empalmes).	Sensor descalibrado (terminal aterrizada).	Aumento de resistencia (demasiados empalmes).	Sensor descalibrado (terminal aterrizada).	Aumento de resistencia (demasiados empalmes).	Sensor descalibrado (terminal aterrizada).	Aumento de resistencia (demasiados empalmes).	Sensor descalibrado (terminal aterrizada).	Aumento de resistencia (demasiados empalmes).	Aislamiento interno del solenoide NO.	Aislamiento interno del solenoide NC.
	7SFF1MF4	7SFF1MF8	8SFF1MF4	8SFF1MF8	9SFF1MF4	9SFF1MF8	10SFF1MF4	10SFF1MF8	11SFF1MF4	11SFF1MF8	12SFF1MF4	13SFF1MF4

## **2.4 Análisis de efectos.**

A continuación, se describen los efectos que se evidencian en el ámbito de seguridad, ambiental, operacional e infraestructura, cuando ocurre una falla funcional debido a un modo de falla específico, estimando los costos reparación e impactos en la operación, es importante resaltar que los efectos descritos pueden ser causados debido a la ausencia de una tarea de mantenimiento que prevenga cada modo de falla. En este punto es importante resaltar que no fueron identificadas fallas ocultas.











## 2.5 Análisis de criticidad (Riesgo).

A continuación, se evalúan las consecuencias de cada modo de fallas a través de una matriz de valoración de riesgo cualitativa, la cual tiene como entradas la probabilidad de ocurrencia (frecuencia estimada con la que se presenta o se puede presentar la falla) y su impacto a nivel humano, ambiental, económico y operacional. Las consecuencias son calificadas como alta (inaceptable), media (tolerable) o baja (aceptable). Por otro lado es importante aclarar que el riesgo económico corresponde a los costos de reparación para restablecer la funcionalidad del equipo, el impacto del lucro cesante es medido por las horas down de cada equipo, pues la indisponibilidad de los taladros afecta el avance del plan minero y de la generación de inventario de mineral para su acarreo.

**Tabla 10. Matriz de evaluación de riesgos.**

CONSECUENCIAS				PROBABILIDAD					
HUMANAS	SEGURIDAD Y AMBIENTE	OPERACIONAL	ECONÓMICAS	IMPOSIBLE > 10 años (A)	IMPROBABLE < 10 Años (B)	REMOTO < 5 Años (C)	OCASIONAL < 2 Años (D)	MODERADO < 6 Meses (E)	FRECUENTE ± 1 Mes (F)
Mas de un muerto	Efectos irreversibles	> 24 Horas Down	> USDS 100.000	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Incapacidad permanente	Efectos irreversibles en menos de 2 años	< 24 Horas Down	< USDS 100.000	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Incapacidad temporal	Efectos reversibles en menos de 6 meses	< 18 Horas Down	< USDS 50.000	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Lesiones	Efectos pueden ser controlados	< 12 Horas Down	< USDS 10.000	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Nunguna	No afecta el medio ambiente	< 6 Horas Down	< USDS 1.000	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Alto	Medio	Bajo
------	-------	------

Cód. Modo de Falla	Probabilidad	Seguridad y Ambiente	Humano	Operacional	Económico
1PFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D1	D1
1PFF1MF2	> 10 años	A5	A5	A1	A1
1PFF1MF3	> 10 años	A5	A5	A1	A1
1PFF1MF4	< 2 años	D5	D5	D1	D1
1PFF1MF5	< 2 años	D5	D5	D3	D5
1PFF1MF6	< 5 años	C5	C5	C2	C4
1PFF1MF7	< 2 años	D5	D5	D2	D4
1PFF1MF8	< 2 años	D5	D5	D5	D4
1PFF1MF9	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF10	< 6 meses	E5	E5	E5	E4
1PFF1MF11	< 6 meses	E5	E5	E5	E4
1PFF1MF12	< 6 meses	E5	E5	E5	E4
1PFF1MF13	< 6 meses	E5	E5	E5	E4
1PFF1MF14	< 6 meses	E5	E5	E5	E4
1PFF1MF15	< 6 meses	E5	E5	E4	E4
1PFF1MF16	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF17	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF18	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
1PFF1MF19	< 6 meses	E5	E5	E5	E5
1PFF1MF20	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF21	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF22	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF23	> 10 años	B5	B5	B1	A1
1PFF1MF24	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
1PFF1MF25	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF26	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF27	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF28	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
1PFF1MF29	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF30	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF31	< 2 años	D5	D5	D5	D5
1PFF1MF32	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
1PFF1MF33	> 10 años	A5	A5	A1	A1
1PFF1MF34	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
1PFF1MF35	> 10 años	A5	A5	A1	A1
1PFF1MF36	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
1PFF1MF37	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
1PFF1MF38	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
1PFF1MF39	> 10 años	A5	A5	A1	A1
1PFF1MF40	< 2 años	D5	D5	D1	D1
1PFF1MF41	< 5 años	C5	C5	C4	C4
1PFF1MF42	< 5 años	C5	C5	C4	C4
1PFF1MF43	< 2 años	D5	D5	D4	D4
1PFF1MF44	< 2 años	D5	D5	D3	D4
1PFF1MF45	< 1 mes	F5	F5	F4	F4
1PFF1MF46	< 2 años	D5	D5	D3	D4
1PFF1MF47	< 2 años	D5	D5	D3	D4
1PFF1MF48	< 2 años	D5	D5	D3	D4
1PFF1MF49	< 2 años	D5	D5	D2	D4
1PFF1MF50	< 2 años	D5	D5	D2	D4
1PFF1MF51	< 2 años	D5	D5	D5	D4
1PFF1MF52	< 5 años	C4	C5	C3	C4
1PFF1MF53	< 6 meses	E4	E5	E4	E5
1PFF1MF54	< 2 años	D4	D5	D4	D5
1PFF1MF55	< 2 años	D4	D5	D4	D5

Cód. Modo de Falla	Probabilidad	Seguridad y Ambiente	Humano	Operacional	Económico
1PFF1MF56	< 2 años	D5	D5	D5	D4
1PFF1MF57	< 2 años	D4	D5	D4	D5
1PFF1MF58	< 2 años	D4	D5	D4	D5
1PFF1MF59	< 5 años	C4	C5	C4	C5
1SFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D2	D4
1SFF1MF2	< 2 años	D5	D5	D2	D4
1SFF1MF3	< 10 años	B5	B5	B2	B4
1SFF1MF4	< 10 años	B5	B5	B2	B4
2SFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D1	D1
2SFF1MF2	> 10 años	A5	A5	A1	A1
2SFF1MF3	> 10 años	A5	A5	A1	A1
2SFF1MF4	< 2 años	D5	D5	D1	D1
2SFF1MF5	< 2 años	D5	D5	D3	D5
2SFF1MF6	< 5 años	C5	C5	C2	C4
2SFF1MF7	< 2 años	D5	D5	D2	D4
3SFF1MF1	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
3SFF1MF2	< 10 años	B5	B5	B4	B4
3SFF1MF3	< 5 años	C5	C5	C4	C4
3SFF1MF4	< 10 años	B5	B5	B4	B4
3SFF1MF5	< 5 años	C4	C5	C2	C4
3SFF1MF6	< 10 años	B4	B5	B2	B4
3SFF1MF7	< 6 meses	E5	E5	E5	E4
3SFF1MF8	< 6 meses	E5	E5	E5	E4
3SFF1MF9	< 5 años	C5	C5	C5	C4
3SFF1MF10	< 2 años	D4	D5	D5	D5
3SFF1MF11	< 2 años	D5	D5	D5	D4
3SFF1MF12	< 2 años	D5	D5	D5	D5
3SFF1MF13	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
3SFF1MF14	> 10 años	A5	A5	A1	A1
3SFF1MF15	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
3SFF1MF16	> 10 años	A5	A5	A1	A1
3SFF1MF17	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
3SFF1MF18	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
3SFF1MF19	< 6 meses	E5	E5	E1	E1
3SFF1MF20	< 5 años	C4	C5	C3	C4
3SFF1MF21	< 2 años	D4	D5	D4	D5
3SFF1MF22	< 2 años	D4	D5	D4	D5
3SFF1MF23	< 2 años	D4	D5	D4	D5
3SFF1MF24	< 6 meses	E4	E5	E4	E5
4SFF1MF1	< 5 años	C4	C5	C3	C4
4SFF1MF2	< 2 años	D4	D5	D4	D5
4SFF1MF3	< 2 años	D4	D5	D4	D5
4SFF1MF4	< 5 años	C4	C5	C4	C5
4SFF1MF5	< 2 años	D4	D5	D4	D5
4SFF1MF6	< 2 años	D5	D5	D5	D5
4SFF1MF7	< 6 meses	E5	E2	E1	E1
5SFF1MF1	< 5 años	C4	C5	C3	C4
5SFF1MF2	< 2 años	D4	D5	D4	D5
5SFF1MF3	< 2 años	D4	D5	D4	D5
5SFF1MF4	< 2 años	D4	D5	D4	D5
6SFF1MF1	< 5 años	C4	C5	C3	C4
6SFF1MF2	< 2 años	D5	D5	D5	D5
6SFF1MF3	< 2 años	D4	D5	D4	D5
6SFF1MF4	< 2 años	D4	D5	D4	D5

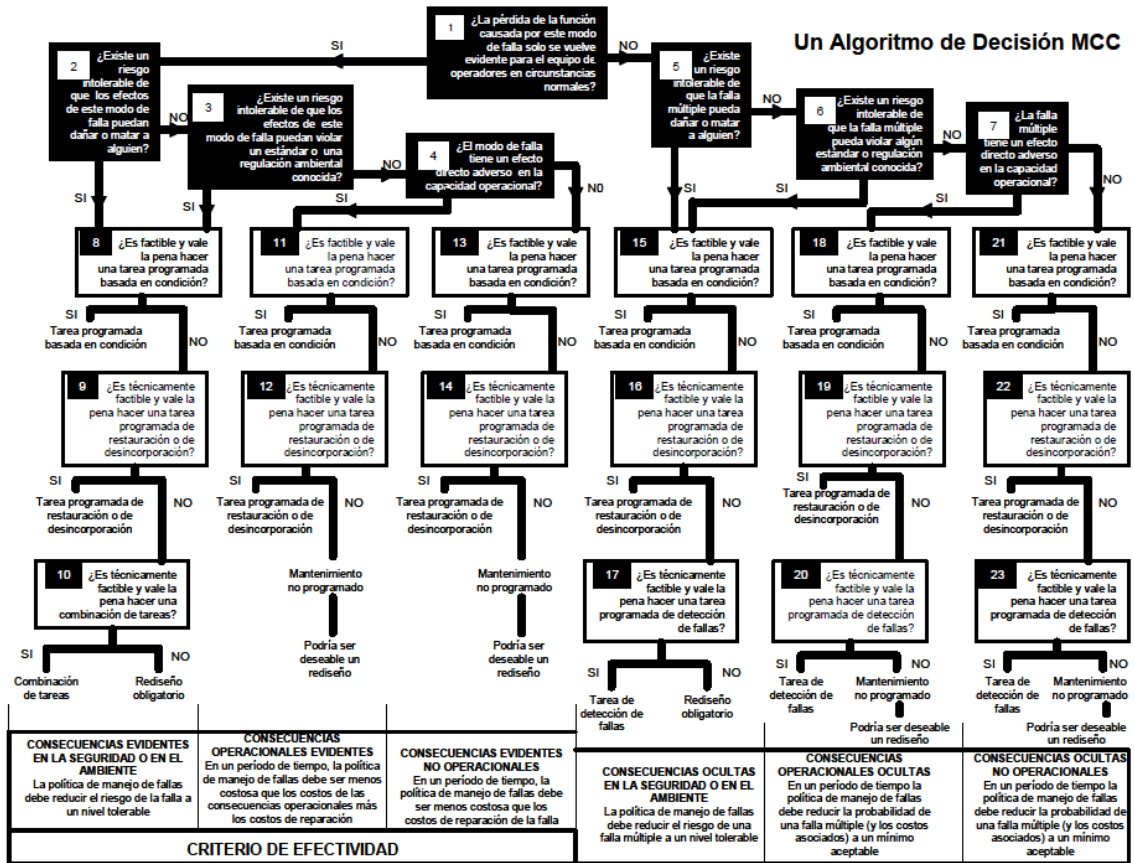
Cód. Modo de Falla	Probabilidad	Seguridad y Ambiente	Humano	Operacional	Económico
6SFF1MF5	< 5 años	C4	C5	C4	C5
6SFF1MF6	< 5 años	C5	C5	C5	C4
6SFF1MF7	< 5 años	C4	C5	C3	C4
6SFF1MF8	< 2 años	D4	D5	D4	D5
6SFF1MF9	< 2 años	D4	D5	D4	D5
6SFF1MF10	< 2 años	D4	D5	D4	D5
7SFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D5	D5
7SFF1MF2	< 6 meses	E5	E5	E5	E5
7SFF1MF3	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
7SFF1MF4	< 2 años	D5	D5	D5	D5
7SFF1MF5	< 2 años	D5	D5	D5	D5
7SFF1MF6	< 2 años	D5	D5	D5	D5
7SFF1MF7	< 2 años	D5	D5	D5	D5
7SFF1MF8	< 5 años	C5	C5	C5	C5
8SFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D5	D5
8SFF1MF2	< 6 meses	E5	E5	E5	E5
8SFF1MF3	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
8SFF1MF4	< 2 años	D5	D5	D5	D5
8SFF1MF5	< 2 años	D5	D5	D5	D5
8SFF1MF6	< 2 años	D5	D5	D5	D5
8SFF1MF7	< 2 años	D5	D5	D5	D5
8SFF1MF8	< 5 años	C5	C5	C5	C5
9SFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D5	D5
9SFF1MF2	< 6 meses	E5	E5	E5	E5
9SFF1MF3	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
9SFF1MF4	< 2 años	D5	D5	D5	D5
9SFF1MF5	< 2 años	D5	D5	D5	D5
9SFF1MF6	< 2 años	D5	D5	D5	D5
9SFF1MF7	< 2 años	D5	D5	D5	D5
9SFF1MF8	< 5 años	C5	C5	C5	C5
10SFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D4	D5
10SFF1MF2	< 6 meses	E5	E5	E4	E5
10SFF1MF3	< 1 mes	F5	F5	F4	F5
10SFF1MF4	< 2 años	D5	D5	D4	D5
10SFF1MF5	< 2 años	D5	D5	D4	D5
10SFF1MF6	< 2 años	D5	D5	D4	D5
10SFF1MF7	< 2 años	D5	D5	D4	D5
10SFF1MF8	< 5 años	C5	C5	C4	C5
11SFF1MF1	< 2 años	D5	D5	D4	D5
11SFF1MF2	< 6 meses	E5	E5	E4	E5
11SFF1MF3	< 1 mes	F5	F5	F4	F5
11SFF1MF4	< 2 años	D5	D5	D4	D5
11SFF1MF5	< 2 años	D5	D5	D4	D5
11SFF1MF6	< 2 años	D5	D5	D4	D5
11SFF1MF7	< 2 años	D5	D5	D4	D5
11SFF1MF8	< 5 años	C5	C5	C4	C5
12SFF1MF1	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
12SFF1MF2	< 2 años	D5	D5	D5	D5
12SFF1MF3	< 2 años	D5	D5	D5	D5
12SFF1MF4	< 6 meses	E5	E5	E5	E5
13SFF1MF1	< 1 mes	F5	F5	F5	F5
13SFF1MF2	< 2 años	D5	D5	D5	D5
13SFF1MF3	< 2 años	D5	D5	D5	D5
13SFF1MF4	< 6 meses	E5	E5	E5	E5

## **2.6 Definir el plan de actividades de mantenimiento:**

Teniendo en cuenta la evaluación del riesgo, ahora se definen las tareas de mantenimiento, estrategia, intervalos de ejecución para cada modo de falla, así como los recursos necesarios para ser ejecutadas, con el fin de mitigar o eliminar la probabilidad de ocurrencia de la falla y por ende reducir sus efectos. Para hacer la actividad de mantenimiento se evalúa y determina la estrategia de selección de tareas, utilizando el diagrama de decisión de la SAE JA-1012.

**Ilustración 4. Diagrama de decisión para definir estrategias de mantenimiento. (SAE-JA1012, 2002).**

SAE JA1012 Issued JAN2002 (Traducción)



**Tabla 11. Estrategia y definición de tareas de mantenimiento.**

	Descripción de tarea.	Frecuencia		Personal	Repuestos	Herramientas	Horas Hombre	\$ H-H	\$ Repuestos	\$ Total actividad
Análisis de condición (MPd).	Análisis de aceite y revisión de niveles.	250	Horas	1 Mecánico.		Kit de toma de muestras de aceites.	0,5	15,00		15,00
	Análisis de vibración al compresor.	4000	Horas	1 Mecánico entrenado y certificado en inspección por ultrasonido.		Equipo de inspección por ultrasonido.	2	90,00		90,00
	Inspección de cableado de electroválvula y prueba de continuidad.	250	Horas	1 Electricista.		Multímetro	1	30,00		30,00
	Inspección de las mangueras y sus acoples por ultrasonido (detección temprana de turbulencias). Inspección visual.	250	Horas	1 Mecánico entrenado y certificado en detección por ultrasonido.		Equipo de ultrasonido.	1	30,00		30,00
	Inspección por tintas penetrantes.	2000	Horas	1 Mecánico entrenado y certificado en END por tintas penetrantes.		Kit de tintas.	1	30,00		30,00
	Inspección visual de filtros de aire.	250	Horas	1 Mecánico.		Herramientas manuales.	1	30,00		30,00
	Inspección visual de mangueras.	250	Horas	2 Mecánicos.		Herramientas manuales.	1	60,00		60,00
	Inspección visual de tornillos del ventilador.	250	Horas	1 Mecánico.		Herramientas manuales.	0,5	15,00		15,00
	Inspección visual de tornillos.	250	Horas	1 Mecánico.		Herramientas manuales.	0,5	15,00		15,00
	Inspección visual de ventilador y radiador.	250	Horas	1 Mecánico.		Herramientas manuales.	0,5	15,00		15,00
	Inspección visual del acople de caucho.	250	Horas	1 Mecánico.		Herramientas manuales.	2	60,00		60,00
	Inspección visual del eje de entrada al compresor.	1000	Horas	1 Mecánico.		Herramientas manuales.	2	60,00		60,00
	Inspección visual del sensor.	250	Horas	1 Electricista.		Herramientas manuales.	0,5	15,00		15,00

**Tabla 12. Estrategia y definición de tareas de mantenimiento.**

Recuperar condición / Cambio de partes (MPV).	Descripción de tarea.	Frecuencia	Personal	Repuestos	Herramientas	Horas Hombre	\$ H-H	\$ Repuestos	\$ Total actividad
	Cambio de empaques de tapa del tanque de almacenamiento de aire.	2000 Horas	2 Mecánicos. 1 Operador de equipo de izaje y su auxiliar.	Kit de empaque PN 502-7463.	Herramientas manuales. Equipo de izaje.	4	360,00	750,00	1.110,00
	Cambio de filtro separador aire/aceite.	2000 Horas	2 Mecánicos. 1 Operador de equipo de izaje y su auxiliar.	1 Kit de filtros primarios PN 544-5229. 1 Kit de filtros secundarios PN 469-3564.	Herramientas manuales. Equipo de izaje.	5	450,00	3.100,00	3.550,00
	Cambio de kit de sellos del eje de entrada del compresor.	3 Años	2 Mecánicos.	Kit de sellos PN 464-8422.	Herramientas manuales.	12	720,00	870,00	1.590,00
	Cambio de modulo de radiador y ventilador.	5 Años	1 Operador de equipo de izaje y auxiliar. 4 Mecánicos.	Modulo de radiador y ventilador PN 532-8722	Equipo de izaje. Herramientas manuales. Colectores de aceite.	8	1.200,00	490,00	1.690,00
	Sustitución de la válvula de alivio.	1 Años	2 Mecánicos.	Válvula de alivio PN 549-2163	Herramientas manuales.	1	60,00	950,00	1.010,00
	Sustitución de válvula running blowdown.	2 Años	1 Electricista.	Válvula running blowdown PN 449-7123.	Herramientas manuales.	0,5	15,00	550,00	565,00
	Lavado de enfriador de aceite con agua a presión y desincrustante.	250 Horas	1 Mecánico.		Unidad de lavado.	0,5	15,00		15,00
	Limpiar/Reemplazar filtros de aire.	250 Horas	2 Mecánicos.	Kit de filtros de aire PN 503-1731.	Compresor de aire. / Herramientas manuales.	1	60,00	1.370,00	1.430,00
	Limpieza de conectores y cambio de aislante en conectores.	250 Horas	1 Electricista.		Limpiador de contactos.	1	30,00		30,00

**Tabla 13. Estrategia y definición de tareas de mantenimiento.**

	Descripción de tarea.	Frecuencia	Personal	Repuestos	Herramientas	Horas Hombre	\$ H-H	\$ Repuestos	\$ Total actividad
Operar hasta que falle (MCv).	Cambio de sensores de presión de vacío.		1 Electricista.	2 Sensores de presión de vacío PN 320-3065.	Herramientas manuales.	8	240,00	100,00	340,00
	Sustitución de electroválvula.		1 Electricista.	Válvula N.O PN 449-7123	Herramientas manuales.	2	60,00	230,00	290,00
	Sustitución de la válvula espiral.		2 Mecánicos.	Válvula espiral PN: 433-538	Herramientas manuales.	6	360,00	1.520,00	1.880,00
	Cambio de electroválvula de bola de la broca.		2 Mecánicos.	Electroválvula de bola PN 533-4008.	Herramientas manuales.	8	480,00	1.415,00	1.895,00
	Sustitución de la válvula de presión mínima.		2 Mecánicos.	Válvula de presión mínima PN 510-4166.	Herramientas manuales.	6	360,00	4.000,00	4.360,00
	Sustitución de válvula oil-stop.		1 Mecánico.	Válvula oil-stop PN 489-6366.	Herramientas manuales.	3	90,00	2.280,00	2.370,00
	Sustitución de válvula shutdown.		1 Mecánico.	Válvula shutdown PN 449-7101.	Herramientas manuales.	6	180,00	520,00	700,00
	Sustitución de válvula termostática.		2 Mecánicos.	Válvula termostática PN 475-9951.	Herramientas manuales.	3	180,00	1.670,00	1.850,00
	Sustitución del sensor de presión de aceite.		1 Electricista.	Sensor de presión aceite PN 320-3065.	Herramientas manuales.	2	60,00	220,00	280,00
	Sustitución del sensor de presión de vacío.		1 Electricista.	Sensor de presión PN 320-3063.	Herramientas manuales.	2	60,00	220,00	280,00
Sustitución del sensor de temperatura.		1 Electricista.	Sensor de temperatura PN 238-0112.	Herramientas manuales.	2	60,00	53,00	113,00	

**Tabla 14. Relación entre tareas de mantenimiento y modos de falla que se previenen.**

	Descripción de tarea.	Modos de falla				
Análisis de condición (MPc).	Análisis de aceite y revisión de niveles.	1PFF1MF23 1PFF1MF41 3SFF1MF17	1PFF1MF36 1PFF1MF42 3SFF1MF18	1PFF1MF37 1PFF1MF43 3SFF1MF19	1PFF1MF38 3SFF1MF13 3SFF1MF7	1PFF1MF39 3SFF1MF15 3SFF1MF8
	Análisis de vibración al compresor.	1PFF1MF32 3SFF1MF16	1PFF1MF33	1PFF1MF34	1PFF1MF35	3SFF1MF14
	Inspección de cableado de electroválvula y prueba de continuidad.	12SFF1MF2	13SFF1MF2	1PFF1MF25	1PFF1MF29	1PFF1MF46
	Inspección de las mangueras y sus acoples por ultrasonido (detección temprana de turbulencias).	1PFF1MF54 3SFF1MF24	1PFF1MF55 4SFF1MF3	3SFF1MF10 5SFF1MF3	3SFF1MF22 5SFF1MF4	3SFF1MF23 6SFF1MF10
	Inspección visual.	6SFF1MF4	6SFF1MF9			
	Inspección por tintas penetrantes.	1PFF1MF2	1PFF1MF4	2SFF1MF2	2SFF1MF4	
	Inspección visual de filtros de aire.	1PFF1MF12	1PFF1MF13			
	Inspección visual de mangueras.	1PFF1MF53 4SFF1MF2 6SFF1MF5	1PFF1MF57 4SFF1MF4 6SFF1MF8	1PFF1MF58 4SFF1MF5	1PFF1MF59 5SFF1MF2	3SFF1MF21 6SFF1MF3
	Inspección visual de tornillos del ventilador.	3SFF1MF3				
	Inspección visual de tornillos.	1PFF1MF5	2SFF1MF5			
	Inspección visual de ventilador y radiador.	3SFF1MF4	3SFF1MF6			
	Inspección visual del acople de caucho.	1PFF1MF6	1PFF1MF7	2SFF1MF6	2SFF1MF7	
	Inspección visual del eje de entrada al compresor.	1PFF1MF1	1PFF1MF3	2SFF1MF1	2SFF1MF3	
	Inspección visual del sensor.	10SFF1MF1 9SFF1MF1	11SFF1MF1	1PFF1MF16	7SFF1MF1	8SFF1MF1
	Recuperar condición / Cambio de partes (MPv).	Cambio de empaques de tapa del tanque de almacenamiento de aire.	4SFF1MF7			
Cambio de filtro separador aire/aceite.		1PFF1MF15				
Cambio de kit de sellos del eje de entrada del compresor.		1PFF1MF52 6SFF1MF7	3SFF1MF20	4SFF1MF1	5SFF1MF1	6SFF1MF1
Cambio de modulo de radiador y ventilador.		3SFF1MF2				
Sustitución de la válvula de alivio.		1PFF1MF49 1SFF1MF4	1PFF1MF50	1SFF1MF1	1SFF1MF2	1SFF1MF3
Sustitución de válvula running blowdown.		1PFF1MF40				
Lavado de enfriador de aceite con agua a presión y desincrustante.		3SFF1MF1	3SFF1MF5			
Limpiar/Reemplazar filtros de aire.		1PFF1MF10	1PFF1MF11	1PFF1MF14		
Limpieza de conectores y cambio de aislante en conectores.		10SFF1MF3 1PFF1MF24 9SFF1MF3	11SFF1MF3	12SFF1MF1	13SFF1MF1	1PFF1MF18 8SFF1MF3
Operar hasta que falle (MCv).		Cambio de sensores de presión de vacío.	10SFF1MF5	11SFF1MF5		
	Sustitución de electroválvula.	12SFF1MF3	12SFF1MF4	13SFF1MF3	13SFF1MF4	1PFF1MF26
	Sustitución de la válvula espiral.	1PFF1MF27	1PFF1MF30	1PFF1MF31	1PFF1MF47	1PFF1MF48
	Sustitución de la válvula de bola de la broca.	1PFF1MF8				
	Sustitución de la válvula de presión mínima.	1PFF1MF44				
	Sustitución de válvula oil-stop.	1PFF1MF51	1PFF1MF56			
	Sustitución de válvula shutdown.	6SFF1MF6				
	Sustitución de válvula shutdown.	1PFF1MF9	4SFF1MF6	6SFF1MF2		
	Sustitución de válvula termostática.	3SFF1MF11	3SFF1MF9			
	Sustitución del sensor de presión de aceite.	7SFF1MF2 7SFF1MF8	7SFF1MF4	7SFF1MF5	7SFF1MF6	7SFF1MF7
	Sustitución del sensor de presión de vacío.	10SFF1MF2	10SFF1MF4	10SFF1MF6	10SFF1MF7	10SFF1MF8
		11SFF1MF2	11SFF1MF4	11SFF1MF6	11SFF1MF7	11SFF1MF8
		1PFF1MF17	1PFF1MF19	1PFF1MF20	1PFF1MF21	1PFF1MF22
8SFF1MF2		8SFF1MF4	8SFF1MF5	8SFF1MF6	8SFF1MF7	
8SFF1MF8						
Sustitución del sensor de temperatura.	3SFF1MF12 9SFF1MF7	9SFF1MF2 9SFF1MF8	9SFF1MF4	9SFF1MF5	9SFF1MF6	

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Las actividades de mantenimiento preventivo y predictivo incrementaron un 45%, debido al análisis de los diferentes modos de fallas que pueden ocurrir con mayor probabilidad. Con esta estrategia de mantenimiento propuesta, se espera disminuir un 65% la frecuencia de paradas inesperadas a causa del sistema neumático y prevenir paradas inesperadas debido a los modos de falla del compresor, que aunque durante lo transcurrido de sus ciclos de vida no se han presentado, se pueden monitorear, prevenir y planificar.

De las 17.111,43 horas que se reportaron down por la flota de taladros, se busca prevenir aproximadamente 508 horas de tiempo de reparación para los 6 equipos con la ejecución del plan de mantenimiento optimizado, lo que significaría un incremento de 2,96% en la disponibilidad de la flota y con esto la disponibilidad total llegaría hasta el 78,4%. El aumento en la confiabilidad del sistema neumático no asegura alcanzar aún la disponibilidad esperada en el taladro de 94,46%, por lo cual, se recomienda implementar esta estrategia de mantenimiento a los otros 2 malos actores que causan aproximadamente el 50% de los tiempos de reparación de estos equipos (sistema de accionamiento por parte del motor de combustión interna y sistema de perforación).

La implementación del plan de mantenimiento optimizado para el sistema neumático representaría un ahorro estimado en costos de mantenimiento por cada equipo de \$ 4.259,5 USD/año, teniendo en cuenta que para el año 2019 en promedio por cada equipo de la flota se invirtieron \$ 67.540 USD, de los cuales \$ 45.730 USD fueron en actividades de mantenimiento preventivas y \$ 21.810 USD en actividades de mantenimiento correctivas. El costo anual estimado del plan de mantenimiento optimizado por cada equipo de la flota es de \$ 63.280 USD, de los

cuales \$ 50.650 USD corresponderían a las actividades de mantenimiento preventivas y predictivas y \$ 12.630 USD para actividades correctivas.

Un punto a optimizar crítico del plan de mantenimiento concierne al cambio de aceite, el cual de acuerdo al plan propuestose debe realizar dependiendo de los resultados del análisis de aceite y el estado de sus propiedades (salud) y no cada 500 horas de forma preventiva como se viene realizando, por otro lado, durante cada parada de mantenimiento cada 250 horas, al aceite se le debe realizar un proceso de filtrado externo tipo diálisis que garantice la limpieza del aceite y remoción de gran parte de los elementos de desgaste encontrados teniendo presente el grado de limpieza ISO 16/13, sin omitir que previo a cada proceso de filtrado se debe tomar muestras de aceite para su monitoreo.

Dado que los equipos son nuevos, aún no hay un historial de fallos para realizar un análisis de la vida útil de algunas partes como válvulas, solenoides y sensores, además considerando que los tiempos de reparación y los riesgos asociados a estos componentes son bajos se decide reparar una vez se presente la falla a excepción de la válvula de alivio en el tanque de almacenamiento que si se debe cambiar preventivamente cada año, al igual que la válvula running blow down, la cual puede afectar directamente los ejes del compresor si presenta una falla, de acuerdo a lo analizado en la descripción de efectos. Estas estrategias de mantenimiento para estos componentes se encuentran susceptibles a optimizar a medida que se vaya registrando el historial de sus fallas y se pueda realizar un estudio de su curva P-F.

Las mangueras principales son componentes que se les realiza inspección visual para identificar su condición exterior, sin embargo, la mayoría de veces que estos componentes fallan, se debe a desgastes que han presentado en sus capas interiores y el grafado debido a procesos de erosión, sin embargo, es posible

implementar una técnica de mantenimiento predictivo que permite identificar el desgaste interior de las mangueras por ultrasonido, debido a las turbulencias que genera el fluido. Esta es una técnica de mantenimiento que aún no se encuentra maduro en la industria, pero existe y es susceptible a desarrollarse.

Teniendo en cuenta la recolección de datos, historial de fallas, manuales y demás; con la herramienta de matriz de criticidad se concluyó que el compresor de aire es el componente más crítico existente en el sistema neumático, pero a pesar de lo anterior no tenía implementado una estrategia de mantenimiento detallada que garantizara la confiabilidad de este componente más allá del análisis de aceite e inspección visual de mangueras y otros componentes menores. Con la realización del RCM se identificaron alrededor de 16 modos de fallas que pueden afectar la operación del compresor y 7 actividades adicionales que garanticen la evaluación e integridad de este componente.

Por último, se debe tener presente que la implementación del RCM en la flota de taladros MD6250 no aportará resultados instantáneos, sino que su trascendencia podrá ser medida y evaluada de forma confiable en un espacio de tiempo de uno a dos años aproximadamente. Por ende, se debe manejar como un proceso de mediano a largo plazo, con retroalimentaciones continuas, que seguirían optimizando el plan de mantenimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

Caterpillar Inc. (2018). MD 6250 Rotary drill training.

Mining Magazine. (07 de Marzo de 2017). miningmagazine.com. Obtenido de <https://www.miningmagazine.com/development/news/1264160/caterpillar-introduces-md6250-drill>

Mora, A. (2009). Mantenimiento, planeación, ejecución y control. Ciudad de Mexico: Alfa Omega Grupo Editor.

Navarro Elola, L., Pastor, A. C., & Mugaburu Lacabrera, J. M. (1997). Gestión integral del mantenimiento. Barcelona: Editores Marcombo Boixareu.

Patton, J. D. (1995). Preventive Maintenance. The International Society for Measurement and Control. Instrument Society of America.

Salih O. Duffuaa, J. D. (1995). Sistemas de mantenimiento, planeación y control. Ciudad de Mexico: Limusa S.A.

J. Moubray (1997) "Reliability-centered Maintenance" Published by Elseiver Ltd. Second Edition Commun: 5-233.

Prof .Dr. Mustafa Köksal (2015) "Bakım Planlaması" Seçkin Yayınları 2.Baskı s.15.

Deshpande, V. S., & Modak, J. P. (2002). Application of RCM to a medium scale industry. Reliability Engineering and System Safety, 77(1), 31–43.

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004a). Industrial Experience with Classical RCM. *Rcm*, 239–308.

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004b). RCM Methodology—The Systems Analysis Process. *Rcm*, 71–132.

Yavuz, O., Doğan, E., Carus, E., & Görgülü, A. (2019). Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry. *Procedia Computer Science*, 158, 227–234.

D.L. Yang, S.J. Yang. Minimizing the makespan on single-machine scheduling with aging effect and variable maintenance activities. *Omega*, 38 (2010), pp. 528-533

L. Zhong, S. Youchao, O. Ekene. Disassembly sequence planning for maintenance based on metaheuristic method. *An International Journal*, 83 (2011), pp. 138 – 145.

P.A. Scarf, C.A Cavalcante. Hybridblock replacement and inspection policies for a multi-component system with heterogeneous component lives. *European Journal of Operational Research*, 206 (2010), pp. 384-394

Kari Komonen. “A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and benchmarking”. *Int. J. Production Economics*, 2002, 79: 15-31

Kuehn Steven E. Reliability centred maintenance trims nuclear plant cost. *Power Engng* 192; August.

Fox Barry H, Synder Melvin G, Smith Anthony M. Reliability centred maintenance improves operations at TMI nuclear plant.

B. Kazaz, T.W. Sloan, The impact of process deterioration on production and maintenance policies. *European Journal of Operational Research*. 227 (2013) 88–100.

IEC. IEC 60300-3-11/ NEK IEC 60300-3-11: Dependability management, Part 3–11: Application guide Reliability centred maintenance. Norsk elektroteknisk komite (NEK), 1999.

SAE. SAE-JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes, Society of Automotive Engineers, 1999.

SAE. SAE-JA1012: A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard, Society of Automotive Engineers, 2002.

U.P.M.E. (2020). Carbón. Precios del carbón en Colombia. <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>