

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

**PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO A EQUIPO CRÍTICO DE FLOTA DE
PERFORACIÓN EN MINA SUBTERRÁNEA.**

Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero
en MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Integrante: Ivan Felipe Cabrera Pulgar

Profesor guía: Ricardo Javier Ciudad Cartagena



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 PLAN DE MANTENIMIENTO A EQUIPO CRÍTICO DE FLOTA DE PERFORACIÓN EN MINA SUBTERRÁNEA.

Nombre del candidato(a): Ivan Felipe Cabrera Pulgar.

Carrera / Grado: Ingeniería en mantenimiento industrial.

Campus: Viña del mar. Departamento: Mecánica.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Ricardo Javier Ciudad Cartagena, 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 (marcar una opción)

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

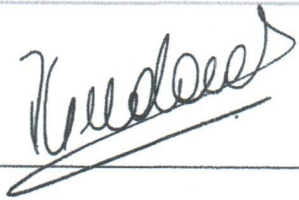
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

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

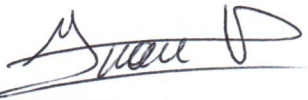
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 28 agosto, 2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25 agosto, 2026 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

KEYWORDS: MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD, PLAN DE MANTENIMIENTO, ANÁLISIS DE CRITICIDAD, MINERÍA, EQUIPOS DE PERFORACIÓN.

El presente trabajo aborda la problemática asociada a un aumento de producción de TPM (toneladas por mes) y a la alta frecuencia de fallas en equipos de perforación utilizados en minería subterránea de oro, los cuales cumplen un rol fundamental dentro del ciclo productivo. Actualmente, estos equipos presentan un alto número de detenciones, tanto por fallas frecuentes como inesperadas, lo que impacta directamente en la continuidad operacional y en los costos de producción.

Con el objetivo de mejorar esta situación, se desarrolla un plan de mantenimiento basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), aplicado a la flota de perforación. El capítulo 1, se realiza un análisis de criticidad mediante el modelo CTR, lo que permite identificar el equipo con mayor impacto en la operación, seleccionándose la perforadora Simba S7D-15 como equipo crítico. Posteriormente en el capítulo 2, se lleva a cabo un análisis detallado de sus funciones, fallas funcionales y modos de falla, apoyado en la herramienta FMECA. A partir de este análisis, se utiliza el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) para jerarquizar los modos de falla más relevantes, identificando aquellos que generan mayor impacto en la operación del equipo. Con base en estos resultados, se aplican los diagramas de decisión de la metodología RCM II, permitiendo definir tareas de mantenimiento específicas, tales como inspecciones a condición y reemplazos programados de componentes críticos.

El capítulo 3 se realiza una evaluación técnico-económica que compara el escenario actual, basado en mantenimiento correctivo, con el plan propuesto. Los resultados evidencian una reducción significativa del riesgo económico asociado a fallas, pasando de aproximadamente 280.000 USD anuales a un costo cercano a 154.000 USD, lo que demuestra la efectividad de la implementación del enfoque basado en confiabilidad. En este sentido, el estudio concluye que la aplicación de metodologías RCM permite optimizar la gestión del mantenimiento, mejorar la cantidad de detenciones de los equipos y contribuir a la eficiencia del proceso productivo en mina subterránea.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	4
SIGLAS	4
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVOS	8
OBJETIVO PRINCIPAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
Capítulo 1: Antecedentes e identificación de equipo crítico.	9
1.1 Antecedentes generales	10
1.2 Contexto Operacional.....	13
1.3 Presentación de la problemática	15
1.4 Análisis de criticidad y jerarquización de activos.	17
1.5 Resultados Análisis de Criticidad.....	22
Capítulo 2: Aplicación de metodología RCM e identificación de modos de fallos a mantenimiento de equipo critico	24
2.1 Metodología RCM.....	25
2.2 EQUIPO CRITICO.....	26
2.2.1 Equipo de perforación Simba S7D-15.	27
2.2.2 Datos técnicos.	29
2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EQUIPO CRÍTICO.	30
2.4 DEFINICIÓN DE FUNCIONES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DEL SISTEMA.	31
2.4.1 Función primaria.....	31
2.4.2 Funciones secundarias.	32

2.4.3 Fallas Funcionales.....	32
2.4.4 Modos de fallas.....	33
2.5 Análisis de modos, efectos de los fallos y su criticidad (FMECA).	34
2.6 Jerarquización de modos de fallos.	43
2.6.1 Designación NPR.....	44
2.6.2 Numero prioridad riesgo	47
2.6.3 Matriz de riesgo de modos de fallos	53
2.7 Aplicación de decisión RCM.	54
2.7.1 Hoja de decisión RCM II.....	56
Capítulo 3: Evaluación técnico-económica de los planes de mantenimientos propuestos.	58
3.1 Evaluación técnica.	59
3.1.1 Exclusión de disponibilidad.	59
3.1.2 Alcances del plan de mantenimiento.	59
3.1.3 Mantenimiento actual.	60
3.1.4 Cuantificación de costos.....	60
3.1.5. Cuantificación de costo sin plan de mantenimiento.....	61
3.3 Análisis económico y ahorro generado.	65
3.4 Recomendaciones	66
3.5 Conclusiones	67
Bibliografía	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de desarrollo.	11
Figura 2: Ciclo de perforación.....	12
Figura 3: Simba S7D.....	14
Figura 4: Simba en postura de perforación.....	16
Figura 5: Representación genérica de la matriz de criticidad.....	22

Figura 6: Flujograma de implantación RCM.	26
Figura 7: Componentes principales del equipo crítico.	28
Figura 8: Matriz de criticidad NPR.	53
Figura 9: Lógica para selección de estrategias de Mantenimiento.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ponderación frecuencia de fallas.	19
Tabla 2: Ponderación SHA.	20
Tabla 3: Ponderación calidad.	21
Tabla 4: Ponderación Costos de mantenimiento.	21
Tabla 5: Resultados Análisis de Criticidad.	23
Tabla 6: FMECA equipo critico S7D-15.	42
Tabla 7: Criterios sugeridos para evaluación de severidad del efecto en calculo NPR.	45
Tabla 8: Criterios sugeridos para evaluación de ocurrencia.	46
Tabla 9: Criterios para evaluación de probabilidad de detección de un modo de fallo.	47
Tabla 10: Evaluación de modos de fallos mediante NPR.	52
Tabla 11: Modos de fallos priorizados.	54
Tabla 12: Hoja de decisión RCM II.	57
Tabla 13: Estimación riesgo cuantitativo sin plan de mantenimiento.	63
Tabla 14: Estimación riesgo cuantitativo plan de mantenimiento propuesto.	65

SIGLAS

RCM: Reliability Centered Maintenance (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad).

FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (Análisis de modos, efectos y criticidad de fallas).

NPR: Número de Prioridad de Riesgo.

CTR: Criticidad Total por Riesgo.

MTTR: Mean Time To Repair (Tiempo Medio de Reparación).

FF: Frecuencia de fallos.

C: Consecuencia.

IO: Impacto de producción.

FO: Flexibilidad operacional.

CM: Costos de mantenimiento.

TPM: Toneladas por mes.

SHA: Seguridad, Higiene y Ambiente.

PLC: Controlador Lógico Programable.

RHS: Rol Handling System.

ECL: Sistema de lubricación de barras.

BSH: Sistema / mordazas de sujeción de barras.

INTRODUCCIÓN

En la zona central de Chile se ubica una mina subterránea dedicada a la producción de oro, con más de dos décadas de operación continua y con una historia minera en el área que supera los 100 años. El yacimiento es explotado en su totalidad mediante minería subterránea, y su proceso de tratamiento contempla tres etapas de chancado, una etapa de molienda, flotación seguida de lixiviación de los concentrados y posterior obtención de oro mediante electro-obtención. La planta de procesamiento trata en promedio 2.400 toneladas de mineral por día, con una capacidad que ha ido en aumento gracias al desarrollo de nuevas vetas y al reprocesamiento de relaves, lo que ha permitido optimizar los costos operativos y prolongar la vida útil del yacimiento.

En la actualidad, la operación busca incrementar su capacidad de producción desde las 72.000 TPM (toneladas por mes) a 100.000 TPM, lo que exige altos niveles de eficiencia en cada etapa del proceso. Dentro de los factores críticos para alcanzar este objetivo se encuentran los equipos de perforación, indispensables en la etapa de producción subterránea. Estos equipos deben operar en condiciones óptimas para cumplir con las metas de avance y rendimiento planificadas; sin embargo, en el último tiempo han presentado un bajo desempeño, principalmente debido a la ocurrencia reiterada de fallas y a una gestión de mantenimiento que no asegura la confiabilidad necesaria.

La flota de equipos de perforación es una de las flotas que cumplen un rol estratégico en la perforación radial, siendo un eslabón esencial dentro del ciclo de producción. Sin embargo, han registrado un alto índice de fallas asociadas a componentes hidráulicos, eléctricos y mecánicos, lo que repercute directamente en la disponibilidad operacional. Este escenario se ve agravado por la falta de seguimiento sistemático de las fallas, así como por

la aplicación de planes preventivos basados en pautas generales que no consideran de manera adecuada la criticidad de los sistemas y funciones del equipo. Como consecuencia, se generan frecuentes horas de inactividad no planificada y se compromete el cumplimiento de la producción.

De esta manera en el presente documento se llevará a cabo un análisis en el cual se implementará la metodología RCM a través del cual identificaremos los fallos potenciales que se puedan presentar en los equipos y proponer las medidas necesarias para evitarlas, reduciendo los costes producto de mantenimientos innecesarios y generando las planificaciones de las tareas a realizar para el correcto funcionamiento del equipo considerado crítico.

Para aplicar esta metodología se considerarán los distintos factores que afectan directa como indirectamente el correcto funcionamiento de los equipos de la flota.

Por otra parte, se identificará la criticidad que presentan los distintos equipos identificando el componente o elemento que presente mayor riesgo a producir una falla para la planta de generación eléctrica, incorporando la matriz FMECA para identificar, las funciones de este y los modos de falla presente, considerando los efectos que estos tienen en la producción, en consideración de estos factores se tomaran las medidas de mitigación necesarias y se tendrá en cuenta el seguimiento y control de las misma, para ver la eficacia de la implementación de tareas preventivas y basadas en condición.

La finalidad de este análisis es enfrentar la problemática presente en la producción a través de estos equipos, donde esta se ve mermada por las fallas y tiempos de reparación que detienen su funcionamiento.

OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL

- Desarrollar un plan de mantenimiento para equipo crítico de la flota de perforación en mina subterránea a través de la metodología RCM, con el propósito de mejorar el plan de mantenimiento, reducir fallas, detenciones no programadas y optimizar los costos de mantenimiento, considerando la alta incidencia que tienen estos equipos en el proceso productivo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el equipo de mayor criticidad dentro de la flota de perforación, mediante el análisis de variables operacionales, de mantenimiento y de confiabilidad, con el fin de priorizar el activo que requiere la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).
- Desarrollar una propuesta de plan de mantenimiento para el equipo crítico identificado, utilizando la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el análisis de modos y efectos de falla (FMEA) y numero de prioridades de riesgo (NPR), con el propósito de establecer tareas de mantenimiento que incrementen la confiabilidad y disponibilidad operacional del equipo.

- Evaluar la viabilidad técnica y económica de la propuesta de mantenimiento, mediante un análisis de modos de falla, frecuencia de ocurrencia y evaluación costo-beneficio, con el objetivo de comparar el plan de mantenimiento actual con el plan propuesto basado en la metodología RCM.

Capítulo 1: Antecedentes e identificación de equipo crítico.

1.1 Antecedentes generales

La minería subterránea orientada a la producción de oro constituye una de las actividades de mayor relevancia en Chile, tanto por su impacto económico, como por las exigencias técnicas que demanda la explotación a gran escala. Este tipo de faenas se caracteriza por desarrollarse bajo superficie mediante una red de galerías, túneles y chimeneas que permiten acceder al mineral de interés, asegurar su extracción de forma segura y continua. Para contextualizar, se muestran los ciclos de trabajo para el área de desarrollo y producción. La minería subterránea se trabaja mediante la construcción de túneles, los que se construyen gracias al siguiente ciclo:

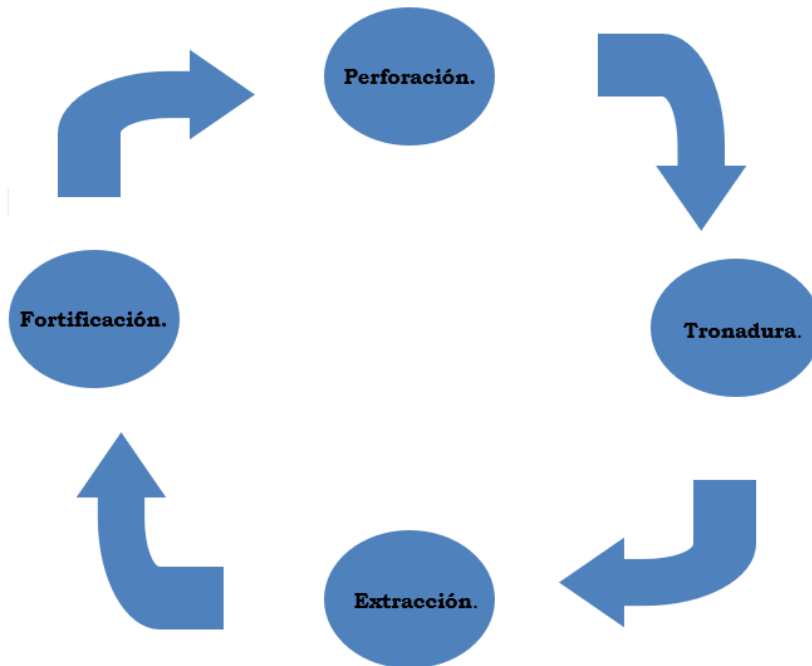


Figura 1: Ciclo de desarrollo.

Fuente: Manual de procedimientos mineros de la empresa.

Los procesos de desarrollo y producción requieren de los equipos de perforación que consisten en realizar orificios en la roca, los cuales son rellenos con explosivos y posteriormente detonados.

Terminada esta fase y su respectiva ventilación, comienza la fase de extracción, la que consiste en sacar el material suelto producto de la tronadura. A continuación, comienza la última etapa, fortificación, que consiste en generar soporte a las paredes laterales y superiores del túnel. Terminada esta etapa, se repite el ciclo.

El ciclo se presenta de la siguiente manera:

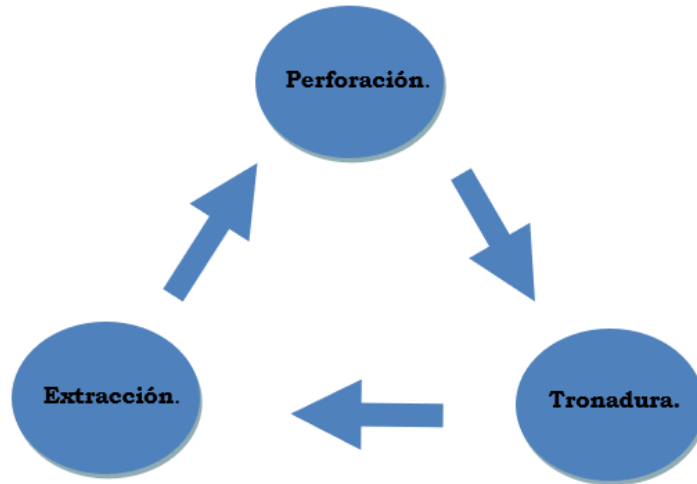


Figura 2: Ciclo de perforación.

Fuente: Manual de procedimiento mineros de la empresa.

En este ciclo, la flota de perforación se posiciona como la base principal y esencial del ciclo productivo, a continuación, se procede a quemar el área cargada con explosivos, finalizando esta etapa se extrae el material para enviarlo a la planta de tratamiento. Y así seguir con el ciclo hasta sacar todo el mineral de la zona.

En resumen, la minería subterránea orientada a la producción de oro se ejecuta mediante un ciclo que comienza con la perforación de la roca, seguida de la carga y detonación de explosivos. Posteriormente, se realiza la ventilación del área tronada para garantizar condiciones seguras, dando paso a la extracción del material fragmentado. Finalmente, se lleva a cabo la fortificación de túneles y galerías para asegurar la estabilidad de la excavación, tras lo cual el ciclo se repite de manera continua para dar continuidad a la producción.

1.2 Contexto Operacional

En la minería subterránea orientada a la producción de oro, los equipos de perforación cumplen un rol central dentro de las operaciones de desarrollo y producción. Estos equipos se utilizan principalmente en la etapa de perforación de producción, donde la precisión en la ubicación, inclinación y longitud de los taladros determina la eficiencia y seguridad de las voladuras posteriores.

El ciclo operativo de los equipos inicia con el traslado del equipo hasta el frente de trabajo, seguido por su estabilización. Una vez en posición, se procede al diseño de los barrenos en función del plan de tronadura, los cuales pueden variar en diámetro y profundidad dependiendo de la geología del macizo rocoso. Posteriormente, se ejecuta la perforación mediante el sistema de martillo hidráulico y rotación, con el apoyo de agua a presión para refrigerar, evacuar detritos y reducir el desgaste de la sarta.

Completada la perforación, los barrenos son cargados con explosivos y detonados, generando la fragmentación del mineral. Tras la ventilación del área, el material tronado es extraído mediante cargadores frontales y transportado a puntos de vaciado para su posterior traslado hacia planta. Una vez liberada el área, se ejecutan las labores de fortificación, que permiten estabilizar las galerías y garantizar la seguridad de la operación.

Dentro de este contexto, los equipos operan en condiciones exigentes, caracterizadas por alta humedad, presencia de polvo, vibraciones y limitaciones de espacio propias de una mina subterránea. Estos factores, sumados a la intensidad de los ciclos de trabajo, generan un desgaste acelerado en componentes hidráulicos, mecánicos y eléctricos, lo que hace imprescindible asegurar su confiabilidad.



Figura 3: Simba S7D
Fuente: Manual de mantención de la empresa.

En resumen, el correcto desempeño de los equipos es determinante para la continuidad del ciclo minero subterráneo. Su operación eficiente garantiza la precisión de la tronadura, la optimización de recursos y la seguridad de la faena, posicionándolos como un activo estratégico dentro del proceso productivo de la minería.

1.3 Presentación de la problemática

La problemática que se presenta en la flota es que está sufriendo una cantidad de 324 de fallas frecuentes como fugas, flexibles dañados, reapriete de pernos, entre otros. Por otro lado, aun así, siguen ocurriendo 140 fallas inesperadas como daños en transmisión, daños en guías de perforación, entre otras, las cuales siguen deteniendo de manera inesperada el equipo. Si sumamos todo esto es decir las detenciones por fallas frecuentes y las detenciones inesperadas, es una cantidad importante de 464 detenciones de la flota. Es por esto por lo que se busca implementar un nuevo plan de mantenimiento que mejore el rendimiento y disminuya las detenciones de equipo que más se detiene en la flota.

Otra consideración a tener en cuenta es el contexto operacional en el que operan estos equipos de perforación, debido a los diversos componentes que se encuentran expuestos a las condiciones del ambiente, temperatura, geografía, polución del aire, etc. Los planes de mantenimiento para estos equipos que no consideren estos aspectos pueden ocasionar diversas pérdidas de producción.

El mantenimiento adecuado planificado a un análisis historial de fallas es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y maximizar la producción. A continuación, se presentan algunos ejemplos de posibles pérdidas de producción causadas por planes de mantenimiento que no se adecuen a los sistemas que lo conforman:

- Fallos en los equipos: Los cilindros, las deslizaderas, flexibles, cables de comunicación y control y otros componentes del sistema también requieren mantenimiento adecuado. Si no se realizan inspecciones regulares, podrían producirse fallos en los elementos. Los cilindros, por ejemplo, pueden afectar a la perforación por lo tanto al rendimiento del equipo.

- **Perdidas por tiempo de inactividad:** Si los planes de mantenimiento no incluyen inspecciones preventivas y detección temprana de posibles problemas, existe un mayor riesgo de tiempo de inactividad no planificado. Las fallas repentinas en el sistema pueden requerir tiempo adicional para su reparación, lo que significa que la flota, no producirá durante ese período. El impacto económico de inactividad dependerá del valor de la onza de oro y de la ley de mineral en gramos por toneladas en que se encuentra la veta de oro.
- **Degradación acelerada de los equipos:** La falta de mantenimiento puede acelerar el deterioro de los equipos y componentes del equipo. Por ejemplo, si no se realizan inspecciones y limpieza periódicas de los cilindros hidráulicos, es más probable que se acumule suciedad que puede causar daños a largo plazo. La falta de mantenimiento también puede contribuir a la corrosión de las componentes o al desgaste prematuro como por ejemplo de los cardales de transmisión, reduciendo la vida útil considerablemente.



Figura 4: Simba en postura de perforación.

Fuente: Extraída en terreno.

Por lo tanto, centraremos nuestra atención principalmente en los fallos de los equipos que componen la flota. Esto se debe a que, en caso de presentarse una falla funcional, ya sea total o parcial, las pérdidas de rendimiento a los diversos modos de fallo que puedan presentarse son considerablemente mayores, afectando la producción total del sistema.

Es fundamental implementar un programa de mantenimiento adecuado que incluya inspecciones regulares, limpieza de cilindros, revisión de componentes y seguimiento de la eficiencia del sistema para maximizar los tiempos de producción y prevenir posibles problemas que puedan afectar a esta.

1.4 Análisis de criticidad y jerarquización de activos.

Se cuenta con 8 equipos de perforación en la flota es por ello que a través de la jerarquización se pretende identificar y seleccionar el equipo que presente mayor riesgo para la producción, para esto consideraremos la aplicación del modelo de criticidad semicuantitativo “CTR”. Este modelo busca a través de distintos factores comparar la frecuencia de un fallo por la severidad de este, con el fin de obtener la criticidad total por riesgo, este es un modelo bastante sencillo y práctico de emplear. A continuación, se presentan las expresiones y fórmulas detalladas para emplear este método:

$$CTR = FF \times C$$

Ecuación 0-1 CTR

Fuente: Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

Donde:

- CTR: Criticidad total por riesgo.
- FF: Frecuencia de fallos (Fallos/año).
- C: Consecuencia de los eventos de fallo.

Además, el valor de consecuencia se obtiene de la siguiente expresión:

$$C = (IO \times FO) + CM + SHA$$

Ecuación 0-2 Consecuencia(C).

Fuente: Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

Siendo:

- IO: Factor de impacto en la producción.
- FO: Factor de flexibilidad operacional.
- CM: Factor de costes de mantenimiento.
- SHA: Factor de seguridad, higiene y ambiente.

La expresión final para este modelo:

$$CTR = FF \times ((IO \times FO) + CM + SHA)$$

Ecuación 0-3 CTR completa

Fuente: Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

Para cada uno de los factores antes mencionados existe una ponderación para la evaluación de la metodología, esta ponderación se obtiene a través de la estimación del riesgo e importancia dada a cada criterio.

✓ Factor de Frecuencia de Fallo (FF).

Frecuencia de fallas
1.- Excelente: menor 24 fallos/año
2.- Bueno: de 24 hasta 40 fallos/año.
3.- Promedio: de 40 hasta 55 fallos/año.
4.- Pobre: de 55 hasta 70 fallos/año.
5.- Muy pobre: más de 70 fallos/año.

Tabla 1: Ponderación frecuencia de fallas.

Fuente: Elaboración propia, basada en Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

✓ Factores de Consecuencias:

- Seguridad – Higiene – Ambiente (SHA).

Seguridad-Higiene-Ambiente
5.- Evento catastrófico: muerte y/o Alto impacto ambiental.
4.- Evento genera: lesión incapacitante y/o afectación sensible al ambiente controlable
3.- Evento genera: daños menos a la integridad física y/o incidente ambiental sin repercusión sobre la normativa legal vigente.
2.- Evento Genera: alarma potencial en seguridad y/o incidente ambiental sin repercusión sobre la normativa vigente
1.- No genera ningún impacto sobre la seguridad y el ambiente

Tabla 2: Ponderación SHA.

Fuente: Elaboración propia, basada en Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

- Calidad (CA).

Calidad
5.- Afectación en calidad (perdidas 75-100%)
4.- Afectación en calidad (perdidas 50-75%)
3.- Afectación en calidad (perdidas 25-50%)
2.- Afectación en calidad (perdidas 0-25%)
1.-No genera ningún impacto en calidad

Tabla 3: Ponderación calidad.

Fuente: Elaboración propia, basada en Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

- Impacto en Costos de mantenimiento (CM)

Costos de mantenimiento (CLP)
5.- Costo Mayor o igual a \$16.000.000
4.- Costo entre \$14.000.000 y \$16.000.000
3.- Costos entre \$12.000.000 y \$14.000.000
2.- Costos entre \$10.000.000 y \$12.000.000
1.- Costo menor o igual a \$10.000.000

Tabla 4: Ponderación Costos de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, basada en Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

Obtenidos los resultados del valor CTR este se clasifica en áreas de jerarquización, a continuación, se muestra la matriz propuesta por el modelo donde cada color representa el grado de criticidad en el que se encuentra el equipo, como se observa el color plomo los con baja criticidad, color amarillo mediana criticidad, color verde alta criticidad y por último color rojo los equipos con una muy alta criticidad que forman la flota de perforación.

Frecuencia

5	M	A	A	MA	MA
4	M	M	A	A	MA
3	B	M	A	A	MA
2	B	B	M	A	A
1	B	B	B	M	M
	1	2	3	4	5

Consecuencias

Figura 5: Representación genérica de la matriz de criticidad.

Fuente: Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

1.5 Resultados Análisis de Criticidad.

Al determinar la CTR para cada equipo asociado a la línea de producción de la mina se observan los siguientes resultados:

Equipos	CTR	Jerarquización
S7D-15	25	Muy alta criticidad
S7D-1	20	Muy alta criticidad
S7D-8	16	Alta criticidad
S7D-17	12	Alta criticidad
S7D-3	6	Mediana criticidad
S7D-2	6	Mediana criticidad
S7D-16	8	Mediana criticidad
S7D-4	3	Baja criticidad

Tabla 5: Resultados Análisis de Criticidad.

Fuente: Elaboración propia, basada en resultados de análisis de criticidad CTR.

Como se observa el equipo critico asociado a la flota de perforación de mina subterránea que presenta mayor riesgo es el equipo Simba S7D-15, es por lo que se le dará énfasis en la aplicación y utilización de la metodología RCM.

**Capítulo 2: Aplicación de metodología RCM e identificación de modos de fallos a
mantenimiento de equipo crítico**

2.1 Metodología RCM

Aunque la flota está compuesta por 8 equipos de perforación del mismo modelo (Simba), el análisis de criticidad CTR realizado en el Capítulo 1 permitió identificar diferencias importantes en comportamiento operacional entre las unidades, considerando frecuencia de fallas, impacto en producción, costos y seguridad.

El equipo S7D-15 presentó la mayor criticidad total, por lo que aplicar RCM sobre él es consistente con la filosofía del mantenimiento centrado en confiabilidad, que exige priorizar el activo más crítico dentro del contexto operacional.

En consecuencia, no es necesario aplicar RCM a toda la flota; el análisis se enfoca en el equipo que representa mayor riesgo para la operación.

“Reliability-centered maintenance (RCM) is a strategy for prioritizing assets and preventing failure... Instead of implementing a sweeping maintenance strategy across an entire organization, RCM maintenance accounts for the needs of individual assets and adjusts each maintenance plan accordingly” (Fluke Reliability, 2025)

La cita anterior hace referencia a la metodología RCM diciendo que es una estrategia para priorizar los activos y prevenir las fallas. A diferencia de implementar un plan de mantenimiento general para todos los equipos, el RCM busca el equipo o componente crítico individual para ajustar cada plan de mantenimiento.

La metodología RCM debe responder a 7 preguntas:

¿Cuáles son las funciones y parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?

¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?

¿Cuál es la causa de cada falla funcional?

¿Qué sucede cuando ocurre una falla?

¿En que sentido es importante la falla?

¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

A continuación, se muestra un flujograma de implantación de RCM:

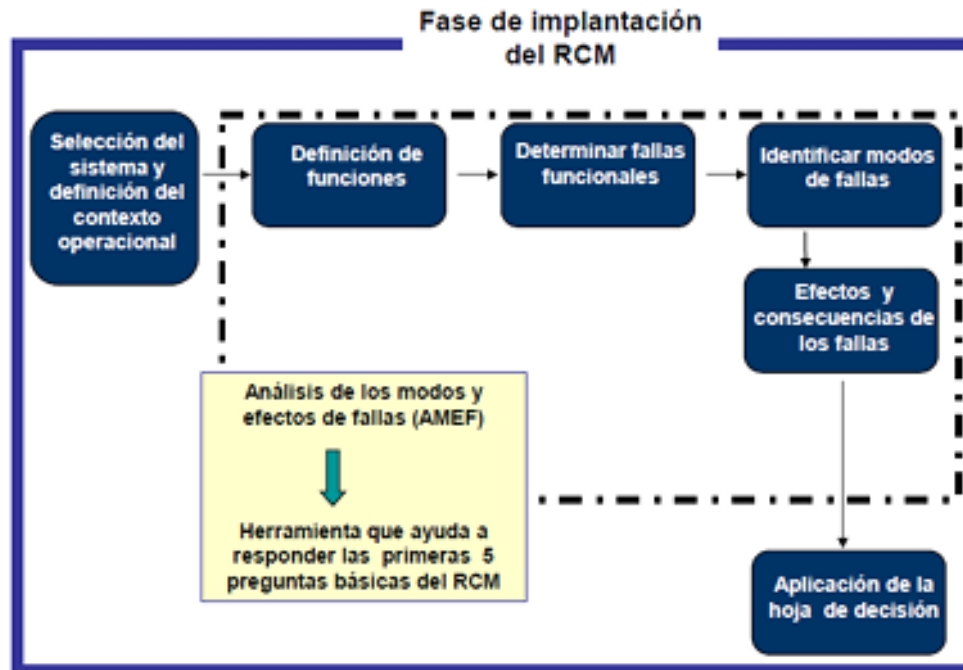


Figura 6: Flujograma de implantación RCM.

Fuente: Elaboración propia, basada en Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra.

2.2 EQUIPO CRÍTICO.

Tras la aplicación del análisis y jerarquización mediante el modelo de criticidad semicuantitativo, se obtuvo que el equipo simba S7D-15 presenta el mayor riesgo para la producción y operatividad eficiente de la flota. En virtud de esta evaluación, se presenta detalladamente el equipo crítico. Se procederá a aplicar la metodología RCM con el objetivo de garantizar su óptimo desempeño y mitigar cualquier riesgo potencial asociado a su funcionamiento.

2.2.1 Equipo de perforación Simba S7D-15.

El equipo es fabricado por atlas Copco Rock Drills (Suecia), está diseñado específicamente para perforación radial en minas subterráneas y túneles.

La simba S7D-15 integra sistemas eléctricos, hidráulicos y neumáticos que trabajan de manera sincronizada para controlar el brazo perforador, el sistema de avance, el manejo de barras y la perforación principal. Además de controles digitales dentro de su cabina ergonómica y sus funciones automáticas de carga, descarga y lubricación de barras.

El proceso de perforación se basa en la acción combinada de avance, rotación y percusión. La unidad perforadora, montada sobre un brazo hidráulico But 32 PD, aplica energía de impacto mediante un martillo de roca tipo COP 1838 MEX, el cual transmite sucesivos golpes de alta frecuencia a través de la barra hasta la roca, generando la fragmentación del macizo rocoso. Paralelamente, el sistema hidráulico proporciona la rotación continua del conjunto de perforación.

El dispositivo de avance BMH 6000 controla la presión y velocidad de empuje, manteniendo la alineación y profundidad requeridas según el diseño del patrón de perforación. Asimismo, el sistema de lubricación de roscas y la neblina de agua aseguran la

disipación del calor y la eliminación de deterioros, optimizando la vida útil de los componentes.

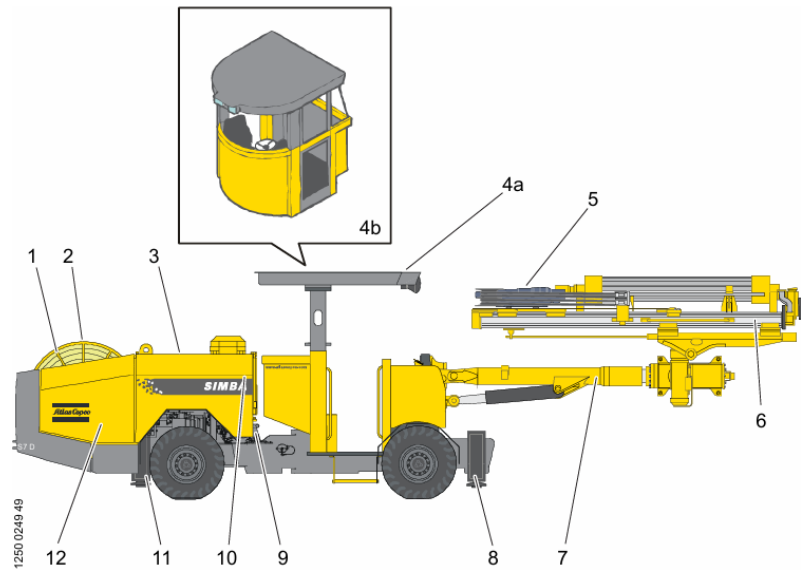


Figura 7: Componentes principales del equipo crítico.

Fuente: Manual de operaciones (Atlas Copco. 2011)

- 1 Tambor de cable.
- 2 Tambor de manguera.
- 3 Motor Diesel.
- 4a Techo protección.
- 4b Cabina.
- 5 Perforadora.
- 6 Dispositivo de avance.
- 7 Brazo.

- 8 Pata de apoyo delantera.
- 9 Bomba hidráulica.
- 10 Depósito de aceite hidráulico.
- 11 Pata de apoyo trasera
- 12 Armario eléctrico.

2.2.2 Datos técnicos.

- Longitud: 10 m.
- Ancho: 2.1 m.
- Altura: 2.8 m.
- Peso: 14 ton.
- Motor diésel: 72 kW.
- Temperatura circundante: 0°C - +40°C.
- Alimentación eléctrica: 400 – 1000 V.
- Fabricante: Atlas Copco Rock Drills.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EQUIPO CRÍTICO.

El inicio del proceso de perforación de la simba S7D-15 comienza desde la partida hacia el punto de trabajo, donde con su motor de combustión interna diésel modelo Deutz BF4L 914 el cual esta equipado de 4 cilindros con turbocompresor, una potencia máxima de 72 kW a 2500 RPM, refrigerado por aire y un sistema de inyección Bosch. De acuerdo con las características de este motor esta destinado a solo el desplazamiento de la simba y posicionamiento impulsando la transmisión hidráulica y brazos auxiliares.

Una vez posicionada la maquina en el punto de perforación la maquina deja de operar con el motor diésel y esta es conectada a energía eléctrica externa entre 400-1000 V, 50-60 Hz lo cual corresponde a una alimentación trifásica de corriente alterna para motores eléctricos, bombas hidráulicas, sistema de control, compresor y perforadora modelo COP 1838 MEX.

Con la alimentación eléctrica activada, se inicia el proceso de posicionamiento del sistema de perforación. Donde el operador debe realizar el control desde el panel de perforación, ajustando movimientos con palancas de posicionamiento, controlando la rotación, la extensión del brazo BUT 32 PD, carrera de avance BMH 6000, ajustando el carro porta barrenos y mordazas y los stringers quienes son los que estabilizan la perforación con cilindros delanteros y traseros.

Una vez ajustado el posicionamiento del sistema de perforación, la maquina esta lista para la perforación del barreno utilizando la perforadora COP 1838 MEX, montada en el sistema de avance BMH 6000. El stringers delantero y trasero estabiliza el equipo contra la roca, el carro porta barras gira y deja caer sobre guías la barra de perforación, una mordaza fija la barra y esta es tomada y roscada por la perforadora, iniciando con la percusión y perforación del barreno, mientras la maquina perfora el sistema de barrido inyecta agua, aire o ambas para evacuar detritos del barreno. Una vez ya perforada por completo la primera barra el sistema de empalmado automático de barras RHS (Rod Handling Sistem) hace el mismo movimiento de giro de la barra, tomado por la mordaza y siendo girada por sobre la otra barra a través de hilo de roscas todo esto automáticamente. Finalmente, el sistema de

lubricación ECL suministra grasa a las roscas de unión de las barras a través de inyección sincronizada.

Una vez finalizado el barrenado, de la misma manera en que se fueron introduciendo las barras al barrenado, son sacadas.

2.4 DEFINICIÓN DE FUNCIONES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DEL SISTEMA.

Función se define “como lo que el dueño o usuario desea que realice un activo físico o sistema” (SAE JA 1011, 1999). Puede ser entendida como el rol o propósito específico que desempeña un componente, equipo o sistema dentro de un entorno de operación. Con la definición de funciones se pretende responder a la primera pregunta del proceso RCM, ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?

A continuación, se dispone de las funciones de el equipo critico Simba S7D-15:

2.4.1 Función primaria.

La función primaria de la simba S7D-15 es realizar la perforación de barrenos en roca, garantizando la ejecución del ciclo de perforación con el rendimiento, profundidad y precisión establecidos en plan de producción de mina.

2.4.2 Funciones secundarias.

Las funciones secundarias del equipo son 7:

- Desplazamiento hacia el punto de trabajo.
- Posicionamiento del brazo BUT 32 PD.
- Manipulación y acoplamiento de barras (RHS / Mordazas).
- Estabilización de la perforación (stringers delantero y trasero).
- Lubricación sincronizada de barras (ECL).
- Barrido de agua / aire.
- Monitoreo y control operacional.

2.4.3 Fallas Funcionales.

“Es el estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado” (SAE JA 1012, 2002).

Para el siguiente caso se establecieron para cada función Primaria y secundaria las fallas funcionales respectivamente.

- Pérdida de presión hidráulica.
- Perforación fuera de parámetros
- Fallo en barrido de detritos.
- Fallo en acoplamiento de barras.
- Pérdida de potencia de desplazamiento.
- Pérdida de estabilidad en el posicionamiento.

2.4.4 Modos de fallas.

“Forma en que la falla ocurre” (BS ISO 14224:2016, 2016), de esta manera el autor también la define de una manera más precisa, como un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional.

A continuación, se definieron los modos de fallos para cada falla funcional, estos son:

- Ruptura de flexibles.
- Bomba hidráulica en mal estado.
- Fugas por sellos de cilindros FE5-FE6.
- Daños en PLC.
- Desalineación del COP 1838.
- Bujes del STRINGER en mal estado.
- Obstrucción de válvula de admisión del compresor.
- Reten de lubricación en mal estado (Sobrecalentamiento).
- Obstrucción de inyector de agua.
- Mordazas BSH en mal estado.
- Bujes del brazo BUT 32PD en mal estado.
- Fugas por sellos en cilindros BHS.
- Daños en motor de rotación RHS.
- Sensor de posicionamiento del brazo dañado.
- Daños en la caja hidrostática.
- Daños en ventilador del motor.
- Daños en bomba de lubricación del motor.
- Daños en el Orbitrol de dirección.
- Daños en sellos del cilindro estabilizador.
- Daños en válvula de frenos.

2.5 Análisis de modos, efectos de los fallos y su criticidad (FMECA).

Para el análisis FMECA se globalizaron solo 2 funciones debido a que la mayor cantidad de funciones secundarias son producto de la función primaria. A continuación, se muestra en análisis FMECA:

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla
1	Realizar perforación de barrenos garantizando precisión, profundidad y alineación.	1.1	Pérdida de presión hidráulica	1.1.1	Ruptura de flexibles	38	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efecto operacional (síntomas): detención inmediata del equipo. Acción correctiva: Reemplazo del flexible.
				1.1.2	Bomba hidráulica en mal estado	2	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efecto operacional (síntomas): detención inmediata del equipo. Acción correctiva: Reemplazo Bomba hidráulica.

				1.1.3	Fugas por sellos de cilindros FE5-FE6	5	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Avance de perforación débil. Acción correctiva: Reemplazo de sellos.
		1.2	Perforación fuera de parámetros	1.2.1	Daño en PLC	8	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efecto operacional (síntomas): Lectura errónea de parámetros. Acción correctiva: Reemplazo de sensor.
				1.2.2	Desalienación del COP 1838	6	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efecto operacional (síntomas): Barrenos torcidos y daños en culatín. Acción correctiva: Ajuste y alineación completa del COP.

				1.2.3	Bujes del STRINGER en mal estado	5	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efecto operacional (síntomas): Vibración, pérdida de estabilidad y desviación del barreno. Acción correctiva: Reemplazo de bujes.
		1.3	Fallo en barrido de detritos.	1.3.1	Obstrucción de válvula de admisión del compresor.	3	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: no Efecto operacional (síntomas): Acumulación de detritos y atascamiento. Acción correctiva: Cambio de filtro y limpieza de válvulas.
				1.3.2	Reten de lubricación en mal estado (sobrecalentamiento)	2	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: no Efecto operacional (síntomas): Desgaste acelerado del equipo. Acción correctiva:

							Reemplazo de reten de lubricación.
				1.3.3	Obstrucción de inyector de agua	4	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: no Efecto operacional (síntomas): Atascamiento y acumulación de detritos. Acción correctiva: Reemplazo de inyector de agua.
		1.4	Fallo en acoplamiento de barras	1.4.1	Mordazas BSH en mal estado	6	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Detección del empalmado de barras. Acción correctiva: Reemplazo de mordazas.

				1.4.2	Bujes del brazo BUT 32PD en mal estado	5	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Vibraciones. Acción correctiva: Reemplazo de casquillos o bujes
				1.4.3	Fugas por sellos en cilindros BSH	5	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): vibraciones perdidas de estabilidad. Acción correctiva: Reemplazo de sellos.
				1.4.4	Daño en motor de rotación RHS	3	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas):no gira el empalmado de barras. Acción correctiva: Reemplazo de motor de rotación.

				1.4.5	Sensor de posicionamiento del brazo dañado	6	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El equipo no puede tomar o entregar la barra al BSH, detención del empalme de barras. Acción correctiva: Reemplazo del sensor.
2	Desplazamiento y posicionamiento en interior mina	2.1	Pérdida potencia de desplazamiento	2.1.1	Daños en la caja hidrostática.	1	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida de potencia y ruidos en la caja. Acción correctiva: Reemplazo caja hidrostática.
				2.1.2	Daños en ventilador del motor	3	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): sobrecalentamiento del motor diésel. Acción correctiva:

							Reemplazo del ventilador.
				2.1.3	Daños en bomba de lubricación del motor	1	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Luz de lubricación del panel encendida. Acción correctiva: Reemplazo de la bomba de lubricación.
		2.2	Perdida de estabilidad en el posicionamiento	2.2.1	Daños en Orbitrol de dirección	3	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Retardo en los movimientos. Acción correctiva: Reemplazo del Orbitrol

				2.2.2	Daños en sellos del cilindro estabilizador	3	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida de presión del estabilizador. Acción correctiva: Reemplazo de sellos.
				2.2.3	Daños en válvula de frenos	1	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): vibración al frenar y holguras. Acción correctiva: Reemplazo de válvula.

Tabla 6: FMECA equipo crítico S7D-15.

Fuente: Elaboración propia, basada en Mollapaza (2025), Aplicación práctica de la técnica RCM a Sistema de Molienda línea 1, con asesoría de Carlos Parra y registros históricos del departamento de mantenimiento mina subterránea (anonimizados).

La tarea de determinar las causas posibles de los modos de falla se facilita teniendo claridad que los efectos de las fallas “describen que sucede cuando ocurre una falla”, no siendo lo mismo que las consecuencias, estas responden a la pregunta “¿Cuál es la relevancia o afectación producida al ocurrir la falla?”. Ambos ítems se encuentran en la estructura de aplicación del RCM (John Moubray, 1991) y se han plasmado en planilla mostrada en tablas Tabla 2.1, que contempla los efectos y consecuencias a nivel de frecuencia, consecuencias económicas, seguridad, higiene e impacto medioambiental.

2.6 Jerarquización de modos de fallos.

Al realizar la jerarquización de modos de fallo, se espera dar respuesta a la pregunta número 5 del proceso RCM. ¿En qué sentido es importante cada falla?, para poder responder esta pregunta se utilizará una herramienta llamada NPR por sus siglas Numero Prioridad de Riesgo, teniendo la información entregada por esta herramienta se identificará cual es el modo de fallo con más relevancia y poder tomar las decisiones correspondientes basándose en RCM.

2.6.1 Designación NPR.

Para designar un Numero Prioridad de Riesgo a los modos de fallo, es necesario utilizar un parámetro, en esta oportunidad el parámetro será obtenido de la norma SAE J1739. Aplicaremos el parámetro de Severidad, Ocurrencia y detectabilidad. Una vez aplicados los criterios sugeridos por la norma, se obtendrá un valor cuantitativo, el cual dará la oportunidad de jerarquizar los modos de fallo para darle criticidad y poder tomar las decisiones necesarias para cada caso. A continuación, se definirán los tres parámetros mencionados anteriormente.

Severidad: A continuación, se muestra la tabla 2-4 con los criterios involucrados y cada valor sugerido.

Efecto	Severidad del efecto	Ranking
Peligros sin advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario. Muy alto ranking de severidad, cuando el modo de falla afecta a la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla no se advierte al ocurrir	10
Peligros con advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario. Muy alto ranking de severidad, cuando el modo de falla afecta a la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla se advierte al ocurrir	9
Muy alto	Perturbación grave a la línea productiva. Las pérdidas pueden alcanzar el 100% del producto. Equipo inoperable, pérdida de la función primaria. Cliente muy insatisfecho	8
Alto	Perturbación menor en la línea productiva. La producción puede tener que ser ordenada y una parte desechada (menor al 100%). Equipo operable, pero con un nivel de calidad reducido. Cliente insatisfecho	7
Moderado	Perturbación Menor en la línea productiva. Una porción (menor al 100%). Puede tener que ser desechada. El equipo operable, pero con algunos ítems de confort inoperables. El cliente experimental insatisfacción.	6

Bajo	Perturbación menor en la línea productiva. 100% del producto tiene que ser adaptado. Equipo operable, pero con algunos ítems de confort con un nivel de calidad reducido. El cliente experimenta algo de insatisfacción.	5
Muy bajo	Perturbación menor en la línea productiva. El producto puede ser ordenado y una porción adaptada. Ajustes, terminaciones y sonido en el ítem no están en conformidad. Defecto notado por la mayoría de los clientes.	4
Menor	Perturbación menor en la línea productiva. Una parte puede ser modificada en la línea, pero fuera de la estación. Se presentan desajustes y chirridos que no están en conformidad. Defecto notado por el promedio de los clientes.	3
Muy menor	Perturbación menor en la línea productiva. Una parte puede ser modificada en la línea, pero fuera de la estación. Se presentan desajustes y pequeñas vibraciones en el ítem que no están en conformidad. Defecto notado por la minoría de los clientes.	2
Ninguno	Sin Efectos	1

Tabla 7: Criterios sugeridos para evaluación de severidad del efecto en calculo NPR.

Fuente: Elaboración propia, basada en SAE J1739 (2009).

Ocurrencia: a continuación, se muestra la 2.3 con los criterios involucrados y el valor sugerido para evaluar la ocurrencia.

Probabilidad de falla	Posible tasa de falla	Ranking
Muy alta: la falla es casi inevitable	≥ 1 en 2	10
	1 en 3	9
Alta: generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos, representan fallas con frecuencias.	1 en 8	8
	1 en 20	7
Moderada: generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos que experimentan fallas	1 en 80	6
	1 en 400	5
	1 en 2.000	4

ocasionales, pero no en mayores proporciones		
bajas: fallas aisladas asociadas con procesos casi idénticos	1 en 15.000	3
Muy baja: solo fallas aisladas asociadas con procesos casi idénticos.	1 en 150.000	2
Remota: la falla es poco probable. No se repiten las fallas de procesos casi idénticos	≤ 1 en 1.500.000	1

Tabla 8: Criterios sugeridos para evaluación de ocurrencia.

Fuente: Elaboración propia basada en SAE J1739 (2009).

Detección: a continuación, se muestra la tabla 2.4 con los criterios involucrados y el valor sugerido para evaluar la detección de la falla.

Detección	Criterios: probabilidad de detección de un modo de falla	Ranking
Casi imposible	No existen controles disponibles para detectar el modo de falla	10
Muy remota	Muy remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	9
Remota	Remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	8
Muy baja	Muy baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	7
Baja	Baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	6
Moderada	Moderada probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	5
Moderadamente alta	Moderadamente alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	4
Alta	Alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	3

Muy alta	Muy alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	2
Casi cierta	Los actuales controles son casi certeros para detectar el modo de falla. Detección confiable	1

Tabla 9: Criterios para evaluación de probabilidad de detección de un modo de fallo.

Fuente: Elaboración propia, basada en SAE J1739 (2009).

2.6.2 Numero prioridad riesgo

Numero de prioridad de riesgo o NPR, se ponderará de la siguiente manera y resulta del múltiplo. $NPR = SEVERIDAD \times OCURRENCIA \times DETECCION$. Lo anterior se muestra en la siguiente tabla 2.5:

Nº	Modo de fallo	Consecuencia	Ocurrencia	Detección	Severidad	NPR	Sistema	Componente
1.1.1	Ruptura de flexibles	Falla evidente, detención inmediata del equipo. Pérdida total de función operativa. No afecta seguridad.	4	4	8	128	hidráulico	Flexibles
1.1.2	Bomba hidráulica en mal estado	Falla evidente, detención inmediata del equipo. Pérdida total de la función hidráulica.	2	10	8	160	hidráulico	Bomba hidráulica
1.1.3	Fugas por sellos de cilindros FE5–FE6	Falla evidente. Avance de perforación débil, pérdida parcial de función operativa.	5	10	7	350	hidráulico	Cilindros FE5–FE6 (sellos)
1.2.1	Daño en PLC	Falla evidente. Lectura errónea de parámetros que afecta el control operativo del equipo.	8	3	6	144	eléctrico	PLC / sensores asociados

1.2.2	Desalineación del COP 1838	Falla evidente. Barrenas torcidas y daños en culatín; pérdida significativa de calidad y costos elevados.	6	10	8	480	Perforación	COP 1838
1.2.3	Bujes del STRINGER en mal estado	Falla evidente. Vibración, pérdida de estabilidad y desviación del barreno.	5	8	7	280	Perforación	STRINGER (bujes)
1.3.1	Obstucción de válvula de admisión del compresor.	Falla evidente. Acumulación de detritos y atascamiento que reduce la eficiencia del sistema de aire.	3	6	6	108	Compresor	Válvula de admisión
1.3.2	Retén de lubricación en mal estado (sobrecalentamiento)	Falla no evidente. Desgaste acelerado del equipo por sobrecalentamiento.	2	4	7	56	Compresor	Retén de lubricación
1.3.3	Obstrucción de inyector de agua	Falla evidente. Atascamiento y acumulación de detritos que afecta el proceso de perforación.	4	5	6	120	Barrido	Inyector de agua

1.4.1	Mordazas BSH en mal estado	Falla evidente. Dificulta el empalmado de barras, afectando la continuidad de la perforación.	6	9	7	378	Perforación	Mordazas
1.4.2	Bujes del brazo BUT 32PD en mal estado	Falla evidente. Vibraciones durante la operación del brazo.	5	6	6	180	Brazo BUT 32PD	Bujes
1.4.3	Fugas por sellos en cilindros BSH	Falla evidente. Vibraciones y pérdida de estabilidad durante la perforación.	5	10	7	350	Perforación	Cilindros
1.4.4	Daño en motor de rotación RHS	Falla evidente. No permite el empalmado de barras, deteniendo la perforación.	3	6	7	126	Perforación	Motor de rotación
1.4.5	Sensor de posicionamiento del brazo dañado	Falla no evidente. Impide tomar/entregar la barra al BSH, deteniendo el empalme de barras.	6	4	7	168	Eléctrico	Sensor de posicionamiento del brazo

2.1.1	Daños en caja hidrostática.	Falla evidente. Pérdida de potencia y ruidos anormales que afectan el desplazamiento del equipo.	1	10	8	80	Tren de accionamiento	Caja hidrostática
2.1.2	Daños en ventilador del motor	Falla evidente. Sobrecalentamiento del motor diésel con riesgo de daño mayor.	3	8	7	168	Motor diésel	Ventilador del motor
2.1.3	Daños en bomba de lubricación del motor	Falla evidente. Alarma de lubricación activa con riesgo severo de daño al motor.	1	10	8	80	Motor diésel	Bomba de lubricación
2.2.1	Daños en Orbitrol de dirección	Falla evidente. Retardo en los movimientos de dirección que afecta la maniobrabilidad del equipo.	3	8	7	168	Tren de accionamiento	Orbitrol de dirección
2.2.2	Daños en sellos del cilindro estabilizador	Falla evidente. Pérdida de presión del estabilizador que afecta la estabilidad del equipo.	3	6	7	126	Tren de accionamiento	Cilindro estabilizador (sellos)

2.2.3	Daños en valvula de frenos	Falla no evidente. Vibraciones y holguras al frenar que degradan el desempeño del sistema de frenos.	1	7	7	49	Sistema de frenos	Válvula de frenos
-------	----------------------------	---	---	---	---	----	-------------------	-------------------

Tabla 10: Evaluación de modos de fallos mediante NPR.

Fuente: Elaboración propia, basada en metodología de Numero de Prioridad de Riesgo (NPR).

2.6.3 Matriz de riesgo de modos de fallos

Al utilizar el número de prioridad de riesgo, se le agrega un valor a cada modo de fallo, pero para poder jerarquizarlos se utilizará una matriz de riesgo el cual involucra el NPR y la severidad de cada modo de fallo, de esta manera se identificará los más críticos para poder decidir los planes de acciones basándose en RCM. A continuación, la matriz de riesgo resultante con datos propios y se dispondrán los modos de falla según su identificación. La matriz de riesgo se puede observar en la Figura 8, siendo los de color verde riesgo aceptable y los de color rojo que necesitan acción correctiva siendo utilizados para el proceso RCM y llevados a la hoja de decisión.

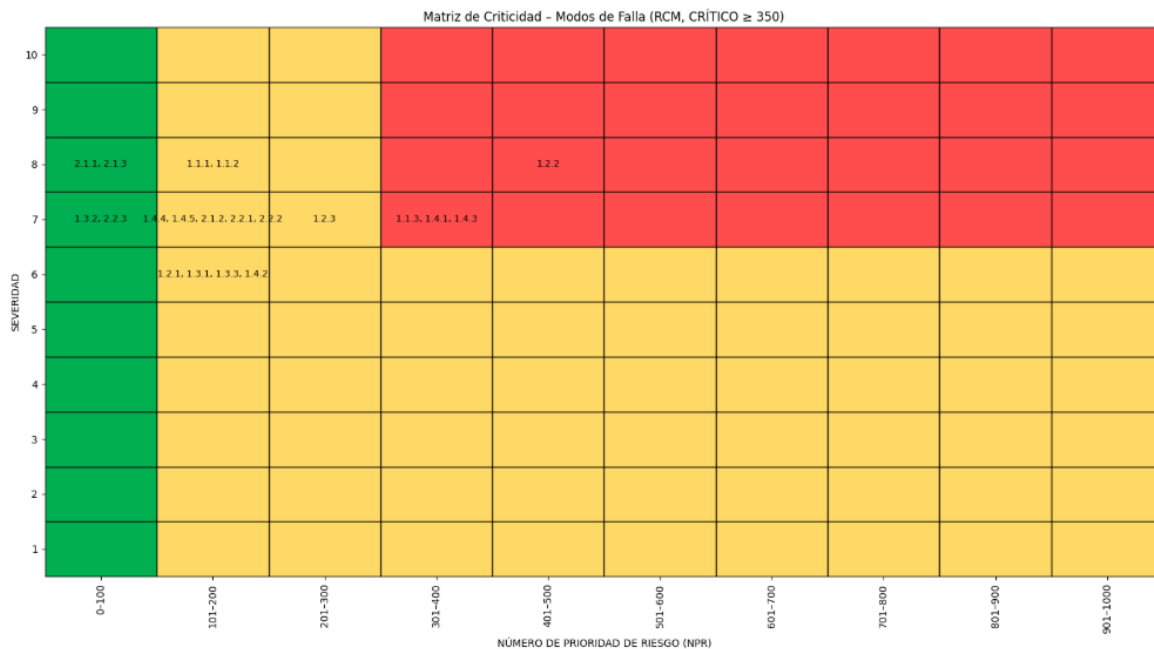


Figura 8: Matriz de criticidad NPR.

Fuente: Elaboración propia, basada en criterios de priorización y adaptada a criterios critico > 350 .

De la anterior imagen se desprenden 4 modos fallo que se muestran en la siguiente tabla 2.6, a los cuales será aplicado el diagrama de decisiones de RCM y de los cuales se generará un plan de mantenimiento.

Nº	Modo de fallo	Efecto	NPR
1.2.2	Desalineación del COP 1838	Falla evidente. Barrenas torcidas y daños en culatín; pérdida significativa de calidad y costos elevados.	480
1.4.3	Fugas por sellos en cilindros BSH	Falla evidente. Vibraciones y pérdida de estabilidad durante la perforación.	350
1.1.3	Fugas por sellos de cilindros FE5–FE6	Falla evidente. Avance de perforación débil, pérdida parcial de función operativa.	350
1.4.1	Mordazas BSH en mal estado	Falla evidente. Dificulta el empalmado de barras, afectando la continuidad de la perforación.	378

Tabla 11: Modos de fallos priorizados.

Fuente: Elaboración propia obtenida de matriz de priorización de riesgo de modos de fallos.

2.7 Aplicación de decisión RCM

A los datos obtenidos por la herramienta NPR utilizada, se le aplicara un proceso de decisiones, las cuales se obtendrán del diagrama de decisiones RCM, obtenidos del libro de Jhon Moubray, RCM II. El método que se utilizara es de tomar el modo de fallo y su efecto, llevándolo y respondiendo los diferentes cuestionamientos hasta llegar a tener un si como respuesta y así determinar cuál de las siguientes tareas necesitan ser planificadas en modo de tarea a condición, tarea de reacondicionamiento cíclico, tarea de sustitución cíclica, tarea de búsqueda de fallos, rediseño obligatorio, ningún mantenimiento preventivo o a la falla. Para entender mejor cada una de las tareas a realizar se describirán de manera breve a continuación.

Tarea a condición: Se generan tareas y acciones para observar si se generan o existen fallas potenciales de esta manera evitar las fallas funcionales. El punto P puede ser detectada a la mitad aproximadamente de su vida útil si esta se grafica P-F.

Tarea de reacondicionamiento cíclico: Básicamente se basa en generar acciones y tareas para reacondicionar la capacidad de un componente, antes de que se produzca la falla funcional, independiente de su condición en ese momento.

Tarea de sustitución cíclico: Se programa la sustitución o descarte de un componente antes del límite de edad definida, independiente de su condición en ese momento.

Tarea de búsqueda de fallos: las tareas de búsqueda de fallos son actividades para chequear una función oculta a periodos regulares para observar si ha fallado.

Tarea de rediseño obligatorio: Consiste en realizar un rediseño o modificación en la especificación de los componentes del equipo, planos, procedimientos operaciones, cambio de maquina o ubicación de esta.

Ningún mantenimiento preventivo: Desde el momento en que la falla es evidente pero no afecta ni la seguridad ni el medio ambiente, entonces la acción es de no realizar ningún mantenimiento y esperar la falla del componente o elemento. Siempre y cuando no se encuentre ninguna tarea cíclica, ni tarea proactiva.

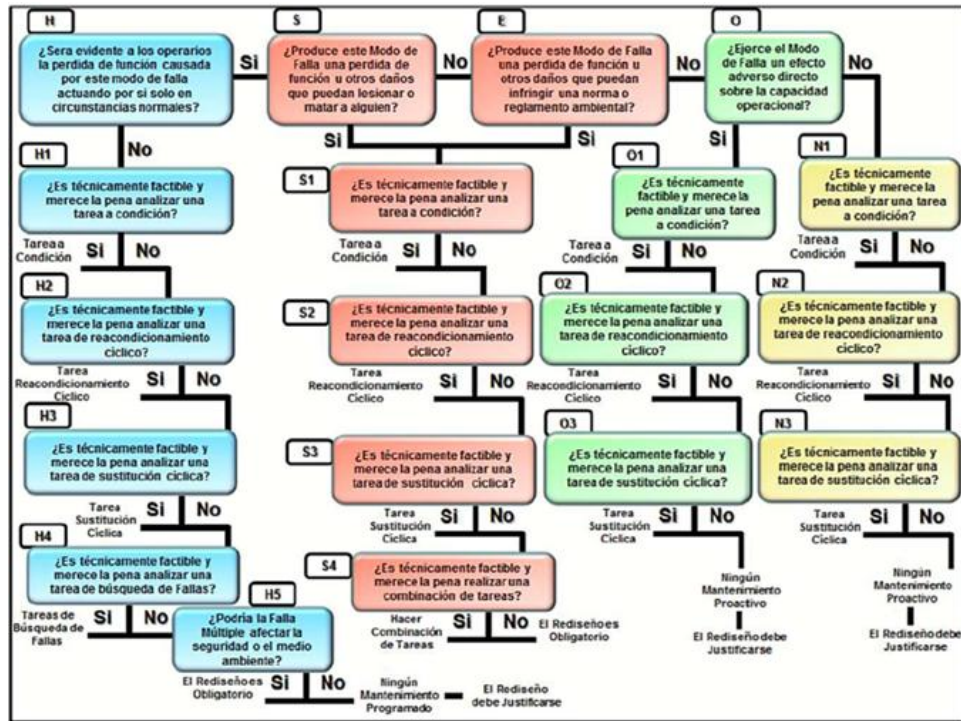


Figura 9: Lógica para selección de estrategias de Mantenimiento.

Fuente: Catalán Orellana (2025), Propuesta de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad a sistema de control de turbogenerador.

2.7.1 Hoja de decisión RCM II

Los modos de fallo resultantes luego de realizar un FMECA y una jerarquización por el método de NPR, se sometieron al proceso de decisiones de RCM II lo que no da por resultado la siguiente hoja de decisión, la que se obtuvo el formato del libro Mantenimiento centrado en la confiabilidad, RCM II de Jhon Moubray.

Hoja de decisión RCM															
Referencias de información		Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas a falta de				Tareas Propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
						S1	S2	S3							
						O1	O2	O3							
#	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1.1.3	Fugas por sellos de cilindros FE5-FE6	S	S			N	N	S	-	-	-	Reemplazo de cilindros hidráulicos por reparados o nuevos (TAREA DE SUSTITUCION CICLICA)	Mensual	Mecánico	
1.2.2	Desalienación del COP 1838	S	S			S			-	-	-	Inspección a condición de alineación: Control desgaste culatín - medición de vibración (TAREA A CONDICION)	Mensual	Mecánico	
1.4.1	Mordazas BSH en mal estado	S	S			N	N	S	-	-	-	Reemplazo de mordazas y calibración (TAREA DE SUSTITUCION CICLICA)	Mensual	Mecánico	
1.4.3	Fugas por sellos en cilindros BSH	S	S			N	N	S	-	-	-	Reemplazo de cilindros BSH por reparados o nuevos (TAREA DE SUSTITUCION CICLICA)	Mensual	Mecánico	

Tabla 12: Hoja de decisión RCM II.

Fuente: Elaboración propia basada en Moubray (1997).

**Capítulo 3: Evaluación técnico-económica de los planes de mantenimientos
propuestos.**

3.1 Evaluación técnica.

El presente estudio técnico-económico de plan propuesto fundamenta la aplicación RCM, la cual permite establecer un enfoque sistemático y estructurado para la selección de tareas de mantenimiento técnica y económicamente justificadas. Como punto de partida, se considera indispensable reconocer el estado actual del mantenimiento, caracterizado principalmente por la ejecución de acciones correctivas posteriores a la ocurrencia de la falla funcional. Bajo este contexto el plan de mantenimiento propuesto busca corregir dichas debilidades mediante la incorporación de tareas proactivas priorizando los modos de fallos identificados en la matriz del NPR.

3.1.1 Exclusión de disponibilidad.

En el análisis no se considera la disponibilidad como variable crítica, ya que la operación cuenta con holgura operacional en la flota. Para cumplir con la exigencia productiva de la mina, correspondiente a 200 toneladas por turno de 12 horas, se requiere una perforación aproximada de 1.000 metros lineales, lo que equivale al uso de 5 equipos operando bajo condiciones normales de 22 metros por hora. Considerando que la flota está compuesta por 8 equipos, existe una capacidad excedente que permite absorber detenciones o fallas sin comprometer el cumplimiento de la producción, por lo tanto, la disponibilidad de los equipos no es una restricción relevante dentro del análisis.

3.1.2 Alcances del plan de mantenimiento.

Para iniciar la evaluación del plan de mantenimiento propuesto, resulta fundamental definir claramente su alcance, ya que este permite establecer los límites técnico y operacionales del estudio. El alcance del presente plan de mantenimiento se centra en los modos de falla identificados en el análisis FMECA y priorizados a través de la matriz NPR, los cuales fueron evaluados mediante hoja de decisión RCM. De esta manera se asegura que

los recursos disponibles se orienten hacia los puntos de mayor criticidad del equipo. Desde el punto de vista práctico el alcance del plan considera que las tareas propuestas puedan ser ejecutadas con los recursos actualmente disponibles en la organización, tanto en términos de personal técnico como en herramientas y equipamiento.

3.1.3 Mantenimiento actual.

En la actualidad el mantenimiento del equipo se basa principalmente en una estrategia reactiva orientada a la corrección de fallas. El personal de mantenimiento no realiza intervenciones sobre los componentes dañados, sino que su accionar se limita en la mayoría de los casos, el reemplazo de los subconjuntos afectados. Por ejemplo, cuando se presenta una falla en los sellos de la bomba de agua que alimenta el sistema de barrido de detritos, no se efectúa reparación directa en terreno, sino que se realiza un reemplazo con otra unidad, la sustituida es enviada a servicio externo de reparación. Esta forma de trabajo obliga tener un stock disponible de componentes reparados o nuevos, es por ello por lo que a través de nuestro nuevo plan también buscamos atacar el problema que muchas veces nos enfrentamos con que no sabemos cuándo vamos a necesitar de ese componente y surge muchas veces que pedimos componentes de más o que no tenemos el repuesto en stock. Así mismo se logrará llegar al monitoreo del estado de ciertos componentes que generan mayor impacto en el equipo crítico y así poder adelantarnos a una posible falla.

3.1.4 Cuantificación de costos.

La cuantificación de costos del plan de mantenimiento propuesto se basa en la correcta identificación de los modos de fallos críticos a través de análisis NPR y en la definición de las tareas obtenidas del diagrama de decisión RCM. Estas tareas, desarrolladas en el capítulo 2 permiten establecer para cada modo de fallo la acción de mantenimiento mas adecuada, ya sea mantenimiento basado en condición, búsqueda de fallas o correctivo controlado. A partir de estas definiciones se determina el costo asociado a cada actividad considerando principalmente la mano de obra requerida, el tiempo de ejecución, los insumos

y cuando corresponde costos d repuestos mayores, en el caso de reemplazo completo de componentes los cuales son enviados a reparación externa o sustituidos por componentes nuevos, estas actividades tienen un costo mas elevado ya que se considera la logística asociada a su reposición. De esta manera se puede comparar el costo de mantenimiento anual actual y el de mantenimiento anual propuesto.

3.1.5. Cuantificación de costo sin plan de mantenimiento.

La cuantificación de costos sin plan de mantenimiento se basa en los modos de fallos identificaros como críticos a través del NPR, considerando que no se ejecutan actividades de mantenimiento o más bien dicho con una política de mantenimiento basado en falla. A continuación, se detallan las fórmulas utilizadas para obtener los valores de los conceptos utilizados para el cálculo de riesgo cuantitativo de los modos de fallo críticos.

- Frecuencia de fallas; cantidad de fallas ocurridas en un periodo determinado.

$$\textit{frecuencia de fallas} = \textit{Cantidad de fallas} \div \textit{Periodo de tiempo}$$

Ecuación 3.1

- MTTR o tiempo medio de reparación; corresponde al tiempo promedio que se tarda en recuperar la función después de haber ocurrido una falla.

$$\textit{MTTR} = \textit{Tiempo total dedicado a reparaciones} \div \textit{Numero de fallas}$$

Ecuación 3.2

- Impacto por no producción; corresponde al costo de ineficiencia por hora relacionado con la producción.
- Costos directos por falla; son costos asociados al proceso de reparación, pudiendo ser de diversa índole, como HH, insumos, repuestos, gastos logísticos, etc.

- Riesgo cuantitativo; presenta un enfoque en medir nivel de riesgo asociado a un evento.

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia de fallas} * (\text{MTTR} * \text{IMP. PROD} + \text{COSTOS DIRECTOS POR FALLA})$$

Ecuación 3.3

En la tabla 3.1: Estimación de riesgo cuantitativo; se presenta el valor estimado en el cual se encuentra expuesto el departamento de mantenimiento ante la ocurrencia de fallas levantadas en el FMCA del CAPITULO 2.

#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	MTTR (horas)	Imp. Prod. USD/hora	Costos directos por falla USD/falla	Riesgo USD/año
1.2.2	Desalineación del COP 1838	6	16	\$ 1.123	\$ 289	\$ 109.541
1.4.3	Fugas por sellos en cilindros BSH	5	10	\$ 1.123	\$ 326	\$ 57.781
1.1.3	Fugas por sellos de cilindros FE5-FE6	5	10	\$ 1.123	\$ 326	\$ 57.781
1.4.1	Mordazas BSH en mal estado	6	8	\$ 1.123	\$ 166	\$ 54.899
Estimación del costo total						\$ 280.001

Tabla 13: Estimación riesgo cuantitativo sin plan de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia, Adaptado de Parra (2025), Curso Planificación y Programación RCM, USM.

Al llevar a dinero las consecuencias de las posibles fallas funcionales, observamos que el riesgo cuantitativo es de una suma cercana a los 280.000 USD solo en los modos de fallos priorizados en el análisis NPR en el periodo de un año. Estos resultados en manos inexpertas, justificaría cualquier esfuerzo por mantener y evitar la ocurrencia de alguna falla, también propicia el caer den el mantenimiento e incurrir en gastos innecesarios asignando frecuencias demasiado conservadoras. Por esto el equipo de implementación de RCM debe idealmente conocer el activo, estudiar el comportamiento y asesorarse con resultados en procesos similares o cualquier otra acción de búsqueda de información relevante.

3.2.5 Cuantificación de costos asociados al RCM.

Continuando con el análisis, se analizan los modos de fallos priorizados en el NPR con el propósito de obtener el costo de implementación de sus tareas propuestas, esto se realiza por cada modo de fallo hasta llegar a un valor global. Se explica en las siguientes ecuaciones:

- Presupuesto anual por actividad.

Costos anual directos de la actividad

$$= Frecuencia * (N^{\circ} \text{ personas} * Costo \text{ HH} * Horas \text{ de ejecucion} + repuestos).$$

- Costo total del mantenimiento.

$$Costos \text{ total mantenimiento} = \Sigma \text{ Costo anual directo de la actividad.}$$

Utilizando estas ecuaciones llevamos los valores a la siguiente tabla 3.2, obteniendo valores globales de costos.

#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	MTTR (horas)	Imp. Prod. USD/hora	Costos directos por falla USD/falla	Riesgo USD/año	Costos directos de la actividad de Mantenimiento RCM
1.2.2	Desalineación del COP 1838	6	16	\$ 1.123	\$ 289	\$ 109.541	\$ 55.680
1.4.3	Fugas por sellos en cilindros BSH	5	10	\$ 1.123	\$ 326	\$ 57.781	\$ 35.868
1.1.3	Fugas por sellos de cilindros FE5-FE6	5	10	\$ 1.123	\$ 326	\$ 57.781	\$ 26.544
1.4.1	Mordazas BSH en mal estado	6	8	\$ 1.123	\$ 166	\$ 54.899	\$ 36.480
Estimación de costos del plan de mantenimiento						\$ 280.001	\$ 154.572

Tabla 14: Estimación riesgo cuantitativo plan de mantenimiento propuesto.

Fuente: Elaboración propia, Adaptado de Parra (2025), Curso Planificación y Programación RCM, USM.

3.3 Análisis económico y ahorro generado.

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 3.2, se observa el riesgo económico anual asociado a los modos de fallas críticos priorizados a través del NPR es de 280.001 USD con una política de mantenimiento correctivo. Por otra parte, el costo anual estimado el nuevo plan de mantenimiento basado en RCM para los mismos modos de fallos corresponde a 154.572 USD

Por lo tanto, el ahorro económico estimado se obtiene de:

$$Ahorro = \text{Riesgo Actual} - \text{Costo Plan RCM}$$

$$Ahorro = 280.001 - 154.572$$

$$Ahorro = 125.429 \text{ USD anuales.}$$

3.4 Recomendaciones

En el desarrollo de este trabajo se recopiló información operacional, histórica y técnica asociada al equipo crítico Simba S7D-15, lo que permitió estructurar un caso de estudio basado en condiciones reales de operación. Resulta recomendable mantener un proceso continuo de levantamiento y validación de datos apoyándose de la experiencia en terreno de los operados y el personal de mantenimiento, ya que algunos comportamientos no se reflejan en registros formales.

La implementación de la metodología RCM debe entenderse como un cambio en la forma de gestionar la confiabilidad de un activo. Si bien los valores económicos pueden parecer bastantes favorables, también uno de los impactos acumulados será la reducción del riesgo operacional y las detenciones no programadas a las que estaba acostumbrado el equipo ayudando a la estabilidad del ciclo productivo.

Se debe considerar que la incorporación de una nueva estrategia de mantenimiento puede generar resistencia en su etapa inicial sobre todo cuando se modifica una práctica tradicional basada en la corrección después de una falla. Otra recomendación es acompañar

la implementación del plan con acciones orientadas a la mejora continua, como capacitaciones, participación del personal en terreno y análisis periódico de los resultados.

Considerando que la mina proyecta un aumento de producción mensual, la confiabilidad de la flota adquiere un carácter estratégico. En este caso se recomienda evaluar en e mediano plazo la extensión progresiva de la metodología aplicada al resto de los equipos de la flota para así dar enfoque a una herramienta sistemática de gestión para toda la operación.

3.5 Conclusiones

Los equipos de perforación en minería subterránea cumplen un rol fundamental dentro del ciclo productivo, ya que, su desempeño influye directamente en la continuidad de las etapas posteriores de tronadura, extracción y fortificación. En este sentido, comprender el comportamiento operacional de estos equipos resulta clave para asegurar la estabilidad del proceso productivo. A partir de la recopilación y análisis de información operacional e histórica, fue posible analizar el desempeño de la flota de perforación y comprender de mejor manera como las fallas recurrentes afectan a la disponibilidad de los equipos y, en consecuencia, la producción de la mina.

El análisis de criticidad realizado a los equipos de la flota permitió identificar aquellos activos que representen un mayor riesgo para la operación. Mediante la aplicación del modelo de criticidad CTR fue posible jerarquizar los equipos considerando la frecuencia de falla y consecuencias asociadas a esta. Como resultado se identificó el equipo S7D-15 presenta mayor criticidad dentro de la flota lo que justifico enfocar el estudio en este equipo. Este análisis permitió evidenciar que, aunque los equipos pertenecen al mismo modelo, su comportamiento operacional puede ser diferente dependiendo de sus condiciones de uso, mantenimiento y contexto operacional.

La aplicación de la metodología RCM permitió analizar en detalle el funcionamiento del equipo crítico, identificando sus funciones, fallas funcionales y modos de falla más relevantes. A través del análisis FMECA y de la jerarquización mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), fue posible reconocer aquellos modos de falla que generan mayor

impacto en la operación del equipo. A partir de esta información se definieron tareas de mantenimiento orientadas principalmente a la inspección a condición y a la sustitución programada de componentes, permitiendo enfocar los esfuerzos y recursos de mantenimiento en los elementos que realmente influyen en la confiabilidad del sistema de perforación.

El análisis técnico-económico permitió comparar la situación actual del mantenimiento, basada principalmente en acciones correctivas, con el escenario obtenido mediante la aplicación de la metodología RCM. Los resultados evidenciaron que las fallas asociadas a los modos críticos representan un riesgo económico anual cercano a los 280.001 USD, mientras que la implementación del plan de mantenimiento propuesto implica un costo aproximado de 154.572 USD, lo que demuestra que la planificación de tareas de mantenimiento permite reducir de forma importante el impacto económico asociado a las detenciones no programadas del equipo.

En términos generales, el desarrollo de este trabajo permitió demostrar que la aplicación de herramientas de confiabilidad, como el mantenimiento centrado en confiabilidad, constituye una alternativa efectiva para mejorar la gestión del mantenimiento en equipos críticos de minería subterránea. Más allá de los resultados económicos obtenidos, uno de los aportes más relevantes del estudio, es evidenciar que el análisis sistemático de la información de fallas permite comprender mejor el comportamiento real de los equipos y tomar decisiones de mantenimiento basadas en criterios técnicos.

Finalmente, considerando que la operación minera proyecta un aumento en su nivel de producción, la confiabilidad de los equipos de perforación adquiere un rol aún más relevante dentro del proceso productivo. En este contexto, la metodología aplicada en este estudio puede servir como base para futuras mejoras en la gestión del mantenimiento de la flota, permitiendo avanzar hacia una planificación más eficiente y orientada a la confiabilidad de los activos.

Bibliografía

Atlas Copco. (2011) Simba S7D. Instrucciones de mantenimiento. Atlas Copco Rock Drills AB, Suecia.

Atlas Copco. (2011) Simba S7D. Instrucciones de funcionamiento. Atlas Copco Rock Drills AB, Suecia.

Mollapaza, J. (2023). Aplicación Práctica de la técnica: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Caso de estudio bomba de ciclones PU001, USM.

Moubray, J (1997). RCM II: Reliability Centered Maintenance.

Parra, C., & Crespo, A. (2008). Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos.

Parra, C. (2025) Planificación y programación de actividades basadas en RCM. Departamento de mecánica, USM.

SAE J1739. (2009). Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).

SAE JA1012 (1999) A Guide to the Reliability Centered Maintenance (RCM) traducido al español en 2002.

García Garrido, S (2003). Organización y gestión integral de mantenimiento (1º ed.). Díaz de Santos, Madrid.