

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



PROPUESTA DE MEJORA AL PLAN DE MANTENIMIENTO
CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD DE CAMIÓN KOMATSU E830 AC
FAENA “EL SOLDADO”

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero/ en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno:

Ricardo Pablo Carroza Fernández

Profesor Guía:

Ing. Luis Gutiérrez Meneses

KEYWORDS: MINERÍA, MANTENIMIENTO, CONFIABILIDAD

La industria minera opera en entornos donde la confiabilidad de los activos, el impacto ambiental y la seguridad de los trabajadores son factores críticos que influyen en la toma de decisiones operativas. Este estudio aplica la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) a una flota de camiones mineros Komatsu 830E AC en la mina a cielo abierto "El Soldado", propiedad de Anglo American. El objetivo es optimizar el plan de mantenimiento, mejorando la seguridad, el cumplimiento ambiental y la eficiencia operativa, al tiempo que se reducen los costos asociados.

La investigación describe la aplicación del RCM mediante un proceso sistemático que incluye la formación de equipos, la priorización de activos según su criticidad y el análisis de modos de falla utilizando el método FMECA. El análisis de criticidad integra métricas de evaluación semicuantitativas, considerando la frecuencia de fallas y sus consecuencias, para priorizar los sistemas. El enfoque principal se centra en el sistema de frenos hidráulicos, que opera bajo altas exigencias de rendimiento. Se analizaron estrategias clave de mantenimiento y modos de falla, lo que llevó a recomendaciones accionables para tareas proactivas y basadas en condición.

El estudio demuestra cómo el RCM contribuye a mejorar la confiabilidad de los activos, reducir tiempos de inactividad y lograr ahorros en costos. Los resultados destacan la importancia de alinear las estrategias de mantenimiento con los contextos operativos y ambientales. Se recomienda implementar indicadores de desempeño para evaluar la efectividad de la metodología a lo largo del tiempo y extender su aplicación a los activos no críticos dentro de la jerarquía de prioridades.

Se recomienda presentar este trabajo en las revistas de mantenimiento: "Predictiva 21" y "NME: Nueva minería y energía".

INDICE	
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	4
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVO ESPECÍFICO	8
CAPÍTULO 1: DESARROLLO DEL ARTÍCULO.	9
1. INTRODUCCIÓN	12
2.1. CONFORMACIÓN DE EQUIPOS	15
2.2. JERARQUIZACIÓN DE LOS EQUIPOS	16
2.3. DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL	17
2.4. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA	18
2.5. ÁRBOL DE DECISIÓN DEL RCM	21
2.6. ASPECTOS IMPORTANTES A TENER EN CUENTA	24
3. OBJETIVOS.	24
3.1. OBJETIVO GENERAL	24
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
4. APLICACIÓN.	25
4.1. ANTECEDENTES GENERALES	25
4.2. CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO	25
4.3. JERARQUIZACIÓN DEL SISTEMA	26
4.4. CONTEXTO OPERACIONAL	28
4.5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	28
4.6. DEFINICIÓN DE FUNCION Y FALLAS FUNCIONALES	31
4.7. MODOS DE FALLA	31
4.8. PROPUESTA DE TAREAS	34
5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	36
6. CONCLUSIONES	37
6.1. RECOMENDACIONES	37
7. REFERENCIAS	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Fases del RCM
Figura 1-2	Conformación del grupo de trabajo
Figura 1-3	Matriz semi cualitativa de riesgo.
Figura 1-4	Diagrama de entradas procesos salida
Figura 1-5	Categorización de modos de falla.
Figura 1-6	Árbol de decisión RCM.
Figura 1-7	Gráfico P-F
Figura 1-8	Esquema de funcionamiento sistema de freno
Figura 1-9	Diagrama del sistema de freno.
Figura 1-10	Diagrama Entrada Proceso Salida.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1	Asignación de frecuencia de fallas.
Tabla 1-2	Jerarquización de sistemas.
Tabla 1-3	Jerarquización de subsistemas.
Tabla 1-4	Modos de falla total.
Tabla 1-5	Modos de falla parcial.
Tabla 1-6	Detalle de costos.
Tabla 1-7	Detalle de costos de hora hombre.
Tabla 1-8	Propuesta de tareas en falla principal.
Tabla 1-9	Propuesta de tareas en falla parcial.
Tabla 1-10	Ahorro potencial.

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

RCM: Reliability centered maintenance (mantenimiento centrado en la confiabilidad)

UNE: Una norma española (Asociación de española de normalización)

CTR: Criticidad total por riesgo.

FF: Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado (fallos/año))

C: Consecuencias de los eventos de fallos.

IO = Factor de impacto en la producción

FO = Factor de flexibilidad operacional

CM = Factor de costes de mantenimiento

SHA = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente

SAE = Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros de Automoción)

B. SIMBOLOGÍA

kPa: kilo Pascales

kms: kilómetros por segundo

tppr: tiempo promedio para reparar

Imp.prod /hora: impuestos de producción por cada hora

Imp x SHA: impuestos de producción en materia de salud higiene y ambiente

INTRODUCCIÓN

En los distintos rubros industriales en donde existen diversos factores que afectan el negocio en sí, factores como la seguridad de las personas, el impacto ambiental y la gestión de activos, (Smith & Hawkins, 2004) factores que a lo largo del tiempo han tenido distintas ponderancias respecto a su importancia a la hora de tomar decisiones que afectan de manera directa los lineamientos y la operación de las distintas áreas (Barbieri, 2024) en las importancias a la hora de tomar decisiones sobre las personas y los activos de las organizaciones el área de mantenimiento a tomado una labor importante, donde no solamente se ven dentro de sus preocupaciones la integridad mecánica de los activos, sino también de las personas y el medio ambiente que puedan verse afectados de manera directa o indirecta de las decisiones que puedan tomarse respecto a esta importante área (Parra & Crespo, 2015).. La importancia de elegir la metodología adecuada radica en la aplicación y adaptación que pueda esta tener en el contexto operacional (Solorzano & Herrera, 2021), pues como todo proceso en busca de una mejora, debe ser medido y evaluado cuantitativamente con respecto a sus resultados (Bloom, 2004), y es ahí donde se erra muchas veces al ver en estas metodologías una finalidad en sí mismas, antes que un medio para lograr los objetivos planteados (Parra & Crespo 2015).

Con lo anterior, tenemos la metodología “RCM” por sus siglas en ingles “Reliability centered maintenance” que significan “mantenimiento centrado en la confiabilidad” que como su nombre lo dice, es una propuesta de acciones de mantenimiento, entendiéndose por mantenimiento (UNE-EN 13306:2018) la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual pueda desarrollar la función requerida. Esta metodología considera de manera importante puntos como la seguridad de las personas, el medio ambiente, integridades mecánicas y factores económicos. Esta metodología que nació en 1991 por John Moubray, cuyo principal objetivo era la industria aeronáutica, pero hoy es ampliamente

utilizada en las diversas industrias debido a sus muy buenos resultados. Parte importante de esta metodología es la importancia del contexto operacional, el cual se busca optimizar, nunca estandarizar, buscando una combinación de estrategias de mantenimiento que garantice el mayor nivel de producción.

Se tiene la faena “El Soldado” propiedad de Anglo American, la cual es una mina a cielo abierto, encargada de extraer cobre y procesarlo hasta entregar concentrado de cobre. Esta faena, en el área mina, tiene 4 importantes flotas de equipos:

- Perforación
- Carguío
- Transporte
- Servicios.

Los desafíos que presenta esta minera en son variados e importantes, ya que al ser pequeña/mediana minería y contar con equipos antiguos, el aplicar metodologías de mantenimiento que permitan aportar a la disponibilidad de los equipos haciendo la atractiva la inversión, pues poder tener competitividad es necesario que la maquinaria deba ser capaz de ofrecer una alta disponibilidad y confiabilidad la cual pueda ser aprovechada por producción. (Vega Mendoza, 2013). El área de Transporte, en donde se busca aplicar la metodología antes vista consta 14 Camiones Caex Komatsu 830E AC, los cuales se evalúan según indicadores como la disponibilidad y su tiempo medio entre fallas.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora al plan de mantenimiento de camión Caex Komatsu 830E AC, centrado en la confiabilidad para aumentar su disponibilidad, disminuir frecuencia de fallas y los costos.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Reconocer la importancia del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y del camión Komatsu 830E-AC, bajo el contexto operacional determinando la jerarquía de sus sistemas en base al riesgo que las fallas presenten.
- Jerarquizar los modos de fallo del equipo a través del análisis FMECA, para definir acciones de mantenimiento que serán parte de la propuesta
- Elaborar la propuesta de mejora con los antecedentes y análisis, evaluando beneficios económicos.

CAPÍTULO 1: DESARROLLO DEL ARTÍCULO.

OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO EN CAMIONES MINEROS KOMATSU 830E AC MEDIANTE LA METODOLOGÍA RCM: UN ENFOQUE HACIA LA CONFIABILIDAD Y LA EFICIENCIA OPERATIVA

Ricardo Pablo Carroza Fernández

RESUMEN:

La industria minera opera en entornos donde la confiabilidad de los activos, el impacto ambiental y la seguridad de los trabajadores son factores críticos que influyen en la toma de decisiones operativas. Este estudio aplica la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) a una flota de camiones mineros Komatsu 830E AC en la mina a cielo abierto "El Soldado", propiedad de Anglo American. El objetivo es optimizar el plan de mantenimiento, mejorando la seguridad, el cumplimiento ambiental y la eficiencia operativa, al tiempo que se reducen los costos asociados.

La investigación describe la aplicación del RCM mediante un proceso sistemático que incluye la formación de equipos, la priorización de activos según su criticidad y el análisis de modos de falla utilizando el método FMECA. El análisis de criticidad integra métricas de evaluación semicuantitativas, considerando la frecuencia de fallas y sus consecuencias, para priorizar los sistemas. El enfoque principal se centra en el sistema de frenos hidráulicos, que opera bajo altas exigencias de rendimiento. Se analizaron estrategias clave de mantenimiento y modos de falla, lo que llevó a recomendaciones accionables para tareas proactivas y basadas en condición.

El estudio demuestra cómo el RCM contribuye a mejorar la confiabilidad de los activos, reducir tiempos de inactividad y lograr ahorros en costos. Los resultados destacan la importancia de alinear las estrategias de mantenimiento con los contextos operativos y ambientales. Se recomienda implementar indicadores de desempeño para evaluar la efectividad de la metodología a lo largo del tiempo y extender su aplicación a los activos no críticos dentro de la jerarquía de prioridades.

Palabras clave: Minería, Mantenimiento, Confiabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En los distintos rubros industriales en donde existen diversos factores que afectan el negocio en sí, factores como la seguridad de las personas, el impacto ambiental y la gestión de activos, (Smith & Hawkins, 2004) factores que a lo largo del tiempo han tenido distintas ponderancias respecto a su importancia a la hora de tomar decisiones que afectan de manera directa los lineamientos y la operación de las distintas áreas (Barbieri, 2024) en las importancias a la hora de tomar decisiones sobre las personas y los activos de las organizaciones el área de mantenimiento a tomado una labor importante, donde no solamente se ven dentro de sus preocupaciones la integridad mecánica de los activos, sino también de las personas y el medio ambiente que puedan verse afectados de manera directa o indirecta de las decisiones que puedan tomarse respecto a esta importante área (Parra & Crespo, 2015)..

La importancia de elegir la metodología adecuada radica en la aplicación y adaptación que pueda esta tener en el contexto operacional (Solorzano & Herrera, 2021), pues como todo proceso en busca de una mejora, debe ser medido y evaluado cuantitativamente con respecto a sus resultados (Bloom, 2004), y es ahí donde se erra muchas veces al ver en estas metodologías una finalidad en sí mismas, antes que un medio para lograr los objetivos planteados (Parra & Crespo 2015).

Con lo anterior, se tiene la metodología “RCM” por sus siglas en ingles “Reliability centered maintenance” que significan “mantenimiento centrado en la confiabilidad” el cual sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias, que se adapta a las necesidades reales del mantenimiento de la organización, entendiéndose por mantenimiento (UNE-EN 13306:2018) la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual pueda desarrollar la función requerida. Esta metodología considera de manera importante puntos como la seguridad de las personas, el medio ambiente, integridades mecánicas y factores económicos.

Esta metodología que tardo alrededor de 30 años en desarrollarse y tuvo su nacimiento en la industria aeronáutica, y desde 1990, con el desarrollo del libro RCM 2 es ampliamente utilizada en las diversas industrias (Moubray, 2004) debido a sus muy buenos resultados. Parte importante de esta metodología es la importancia del contexto operacional, el cual se busca

optimizar, nunca estandarizar, buscando una combinación de estrategias de mantenimiento que garantice el mayor nivel de producción.

Se tiene la faena “El Soldado” propiedad de Anglo American, la cual es una mina a cielo abierto, encargada de extraer cobre y procesarlo hasta entregar concentrado de cobre. Esta faena, en el área mina, tiene 4 importantes flotas de equipos:

- Perforación
- Carguío
- Transporte
- Servicios.

Los desafíos que presenta esta minera en son variados e importantes, ya que al ser pequeña mediana minería y contar con equipos antiguos, el aplicar metodologías de mantenimiento que permitan aportar a la disponibilidad de los equipos haciendo la atractiva la inversión, pues poder tener competitividad es necesario que la maquinaria deba ser capaz de ofrecer una alta disponibilidad y confiabilidad la cual pueda ser aprovechada por producción. (Vega Mendoza, 2013).

El área de Transporte, en donde se busca aplicar la metodología consta 14 Camiones Caex Komatsu 830E AC, los cuales se evalúan según indicadores como la disponibilidad y su tiempo medio entre fallas.

2. METODOLOGÍA RCM

El RCM se podría definir como “Filosofía equipo de gestión del mantenimiento, en la cual un equipo multidisciplinario de seguridad se encarga de optimizar la Confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo los planes de mantenimiento en función de la criticidad de los activos más efectivos, pertenecientes a dicho sistema, teniendo en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de fallas de estos activos, a la seguridad, al ambiente y a las operaciones” (Parra y Crespo 2019)

Con lo anterior, hay siete preguntas planteadas por el autor de esta metodología, las cuales se buscan responder a lo largo del desarrollo de esta, las cuales son:

- ¿Cuáles son las funciones y los 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 cada falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Lo que busca lograr el RCM es mayor seguridad e integridad ambiental, un mejor funcionamiento operacional, una mayor relación costo-eficacia del mantenimiento, mayores vida útil y datos de los equipos, mayor involucramiento del personal y trabajo en equipo.

Los pasos de la aplicación se pueden ver en el siguiente diagrama y se explican a continuación.

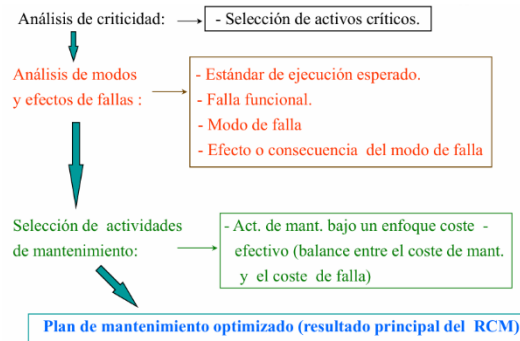


Figura 1-1: Fases del RCM (Parra y Crespo 2015)

2.1. CONFORMACIÓN DE EQUIPOS

Según las 7 preguntas planteadas por esta metodología, se puede ver que el personal de mantenimiento no puede dar respuesta a todas, por lo que la mayoría la puede responder el personal de operaciones, sobre todo en preguntas relacionada con funciones del equipo, fallas y consecuencias de estas. Es por lo anterior que se requieren pequeños grupos que incluyan al menos una persona de mantenimiento y una de operaciones, siendo de mucha importancia el conocimiento del equipo como así de la metodología. La constitución de estos grupos permite un acceso más facilitado al conocimiento y experiencia de cada miembro del grupo, aumentando su entendimiento del activo físico.

Parte vital de este proceso radica en el facilitador, ya que es el más importante para la calidad final de los resultados (Moubray 2024) y que debe contar con las siguientes características principales: amplia capacidad de análisis, alto nivel técnico, alto desarrollo de cualidades personales como liderazgo, credibilidad, seguridad, confianza, y habilidades para conducir reuniones de trabajo, es decir, tener facilidad para comunicarse (Parra y Crespo 2015) Dentro de las actividades que realiza son: guiar al equipo de trabajo, asegurar la profesionalidad de las reuniones, que puedan ser llevadas a cabo con fluidez y normalidad, motivar al equipo de trabajo, asegurar el consenso en las decisiones.

A continuación, un diagrama de la conformación típica de un grupo de revisión RCM.



Figura 1-2: Conformación del grupo de trabajo (Parra y Crespo 2015)

2.2. JERARQUIZACIÓN DE LOS EQUIPOS

Luego de definido el equipo de trabajo, es importante considerar el sistema o equipo el cual será objeto de esta metodología, lo que se busca es empezar con un equipo o sistema crítico para la operación, para luego continuar con equipos semi-críticos y terminar con equipos no críticos, lo que lleva al siguiente paso de determinar en se basa esta criticidad.

Para definir la criticidad de los sistemas, según lo propuesto por Carlos Parra y Adolfo Crespo (Nota técnica #3, 2020) basados en el concepto de criticidad total por riesgo (CTR) presentan un análisis semicuantitativo y práctico el cual está comprendido dentro del concepto de riesgo, comprendido como la multiplicación de la frecuencia por la severidad o consecuencia de este (concepto de PRN: Probability Risk Number, en Jones, 1985) se presenta de la siguiente forma:

$$CTR = FF \times C \quad (1)$$

Donde:

CTR: Criticidad total por Riesgo
 FF: Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado (fallos/año)) C: Consecuencias de los eventos de fallos.

Donde se supone además que el valor de las consecuencias (C), se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$C = (IO \times FO) + CM + SHA \quad (2)$$

Siendo:

IO = Factor de impacto en la producción

FO = Factor de flexibilidad operacional

CM = Factor de costes de mantenimiento

SHA = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente.

La expresión final del modelo de priorización de CTR será la siguiente:

$$CTR = FF \times ((IO \times FO) + CM + SHA) \quad (3)$$

La selección de los factores ponderados se lleva a cabo mediante reuniones de trabajo con la participación de los distintos actores involucrados en las operaciones del activo en análisis, incluyendo personal de operaciones, mantenimiento, procesos, seguridad y medio ambiente. En estas reuniones, se identifican los sistemas prioritarios y se realiza una lluvia de ideas para asignar valores a cada uno de los factores que componen la fórmula de Criticidad Total por Riesgo. (Parra y Crespo 2015)

Para determinar el nivel de criticidad de cada equipo o sistema, se calculan los valores totales de los factores principales: frecuencia de fallos y consecuencias de estos. Estos se ubican en una matriz de criticidad, donde la frecuencia de fallos se representa en el eje vertical y las consecuencias en el eje horizontal, utilizando el resultado final de la expresión, Esta matriz permite clasificar los sistemas en tres áreas de prioridad.

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

Figura 1-3: Matriz semi cualitativa de riesgo. (Parra y Crespo 2019)

Con esta matriz obtenemos 4 sectores:

- MA: Muy Alta Criticidad
- A: Alta criticidad
- M: Media criticidad
- B: Baja criticidad

2.3. DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL

La norma SAE J1011 define el contexto operacional como las circunstancias en las cuales se espera que trabaje un recurso o sistema físico. La definición de un contexto operacional de un activo físico típicamente incluye una descripción global, breve de cómo se utilizará este activo y donde se utilizará, pues de este contexto dependerán las funciones, los modos de falla, las consecuencias de falla y las políticas de manejo de falla que serán aplicadas (SAE, 1999)

La metodología RCM indica que la recopilación de información inicial para el desarrollo del contexto debe contar con los siguientes elementos (Moubray 2004) :

- P&ID's del sistema.
- Esquemáticos del sistema y/o diagramas de bloque. Normalmente estos son desarrollados a partir de los P&ID's.
- Manuales de Diseño y Operación de los Sistemas. Estos proveerán información de la función esperada de los sistemas, como se relacionan con otros sistemas y que límites operacionales y reglas básicas son utilizadas.
- Manuales de los equipos pertenecientes al sistema, que puedan contener información valiosa sobre el diseño y la operación.

Una herramienta útil en la definición del contexto operacional es el diagrama de entrada proceso salida el cual que permite una fácil visualización del sistema, para su posterior análisis, como se logra ver a continuación.

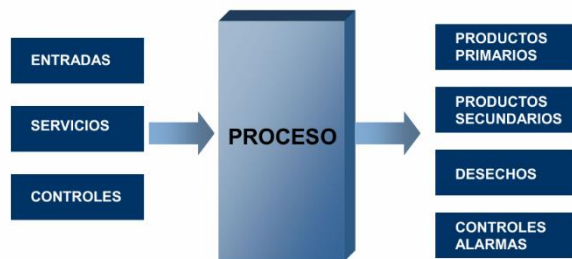


Figura 1-4: Diagrama de entradas procesos salida. (Parra y Crespo 2015)

2.4. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA

El AMEF, por sus siglas: Análisis de modos y efectos de falla, es una herramienta fundamental del RCM, consiste en un análisis en conjunto del grupo, permitiendo definir modos de falla de los componentes del sistema en general centrándose en el impacto y frecuencia de las fallas.

FUNCIONES Y FALLAS FUNCIONALES

El RCM establece un estándar de funcionamiento definido como el valor o rango que permite identificar, medir y evaluar claramente la función de un activo, es decir, su propósito

cuantificable. En el contexto operativo, cada activo puede contar con múltiples estándares de desempeño según sus diversas funciones o aplicaciones.

La norma SAE JA1011 indica que se deben identificar todas las funciones del activo/sistema (todas las funciones primarias y secundarias, incluyendo las funciones de todos los dispositivos de protección) (SAE, 1999)

Las funciones pueden ser primarias, siendo esta la razón específica por la cual cualquier organización adquiere el activo, como así secundarias, siendo estas menos obvias pero desarrolladas por los activos aparte de las funciones primarias (SAE JA1012, 2002)

Tanto las funciones, tanto primarias como secundarias son importantes, en el sentido de que la pérdida de estas puede generar serias consecuencias, por lo que se necesita tenerlas bien identificadas (SAE JA1012, 2002)

Es por esa razón que el proceso RCM comienza preguntando:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento del activo físico en su contexto operacional actual?

FALLA FUNCIONAL

El RCM define la falla funcional como la condición en la que un activo no alcanza el estándar de desempeño esperado, lo que resulta en la incapacidad de cumplir su función completamente o en su cumplimiento parcial (Moubray 2004) Mientras que la norma SAE JA1011 la define como “Un estado en el cual un recurso o sistema físico no es capaz de ejecutar una función específica a un nivel de desempeño deseado”

Existe a lo menos 1 por cada parámetro funcional, estas pueden ser totales o parciales:

Falla Funcional Total: Ocurre cuando un activo se detiene por completo de forma inesperada (Parra y Crespo, 2015) también, un activo falla si es incapaz de hacer lo que el usuario desea que haga (SAE JA1012)

Falla Funcional Parcial: La pérdida parcial ocurre cuando el activo no puede alcanzar el estándar de ejecución esperado, es decir, cuando opera de forma ineficiente o fuera de los límites específicos tolerados (Parra y Crespo, 2015).

MODOS DE FALLA

Una vez determinado todo lo anterior, podemos aplicar el análisis AMEF, el cual busca identificar los modos de falla y sus efectos. Un modo de falla es definido por el RCM como cualquier evento que causa una falla funcional o como la causa física/evidente de cada falla funcional, entendiendo de que cada falla funcional puede tener más de un modo de falla.

Las áreas propensas a los modos de falla son:

- Suciedad, corrosión, erosión, abrasión
- Lubricación inadecuada, ensamble Incorrecto.
- Operación Incorrecta, Materiales incorrectos

El mantenimiento está enfocado a cada modo de falla, por lo que es muy importante enfocarse en que, no en quien causó la falla.

Para determinar los modos de falla, se puede recurrir al fabricante, listas genéricas, registros o historiales técnicos, usuarios, operadores y mantenedores del equipo, considerando fallas históricas, probables y poco probables. Parte importante de definir los modos de falla, es darles un nivel de detalle no limitado, ya que los futuros pasos del proceso dependen directamente de los detalles expresados en los diversos modos.

Todo lo anterior permite incorporar el contexto operacional en el análisis permitiendo entregar un resultado cercano a lo que se maneja.

EFFECTOS DE FALLA

Los efectos de falla describen que pasa cuando ocurre un modo de falla, esta debe incluir la información requerida para evaluar las consecuencias y definir las tareas de mantenimiento necesarias, debe plantearse bajo el supuesto de que no se están implementando medidas preventivas y debe asumirse que los demás dispositivos y procedimientos operativos están funcionando correctamente.

La descripción de los eventos debe contener toda la información necesaria para ayudar a futura evaluación de las consecuencias de las fallas, por lo que se debe constar de los siguientes puntos:

- Evidencia de la falla

- Riesgos para la seguridad/medio ambiente
- Daños secundarios/efectos en la producción.
- Acción correctiva

Con lo anterior, los modos de fallo son categorizados de la siguiente manera siguiendo el diagrama (Carlos parra y Adolfo Crespo 2012).

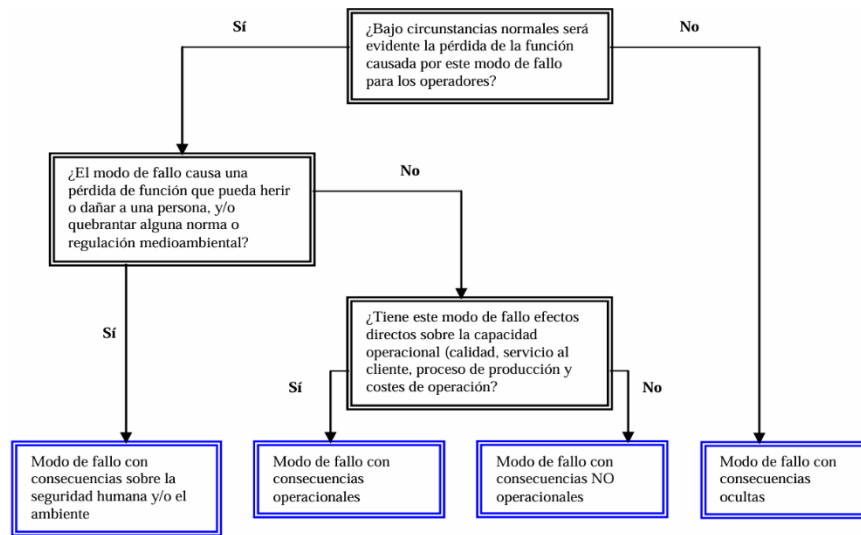


Figura 1-5: Categorización de modos de falla. (Parra y Crespo 2015)

En esta parte se hace importante también poder cuantificar los costos asociados al riesgo por año, lo cual se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo} \times \text{año} = \text{Frecuencia de falla (falla/año)} \times \text{Consecuencia (\$/falla)} \quad (4)$$

Con este análisis ya realizado se puede dar respuesta a las 5 primeras preguntas planteadas en un inicio.

2.5. ÁRBOL DE DECISIÓN DEL RCM

Una vez realizado el análisis, el siguiente paso es que el equipo deberá definir el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de fallo analizado, dicho de otra manera, se ponen a competir las estrategias de

mantenimiento en base a un análisis costo/beneficio entendiendo que se busca la mejor con respecto al modo de falla.

Para seleccionar el tipo de actividad el RCM nos entrega un árbol de decisión el cual es resumido de la siguiente manera:

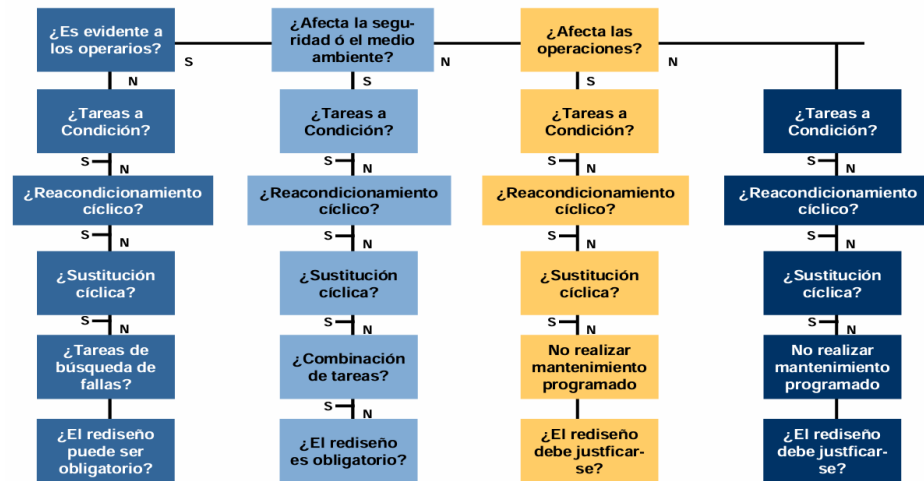


Figura 1-6: Árbol de decisión RCM. (Parra y Crespo 2015)

2.5.1. TAREAS PROACTIVAS, TAREAS POR CONDICIÓN

Tareas a condición: este mantenimiento busca evaluar la condición del activo, para evitar que llegue a una clara condición de falla potencial, para lo cual se tiene el siguiente gráfico P-F:

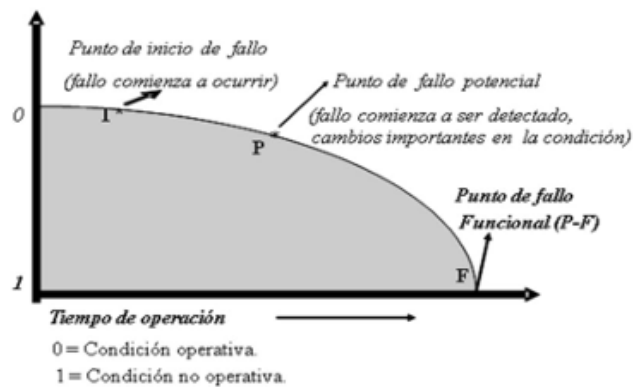


Figura 1-7: Gráfico P-F (Parra y Crespo 2015)

En donde la condición del activo al estar en el punto "P" se encuentra en falla potencial, y al transcurrir el intervalo señalado llega al punto "F" donde es falla completa. Esta falla potencial es la evidencia en la condición de una falla inminente definida como una condición detectable que indica que una falla

funcional está próxima a ocurrir o se encuentra en proceso de manifestarse.

En estas tareas se sigue una variable física que cambia por el tiempo, tiene 3 niveles:

1. Sentidos humanos
2. Instrumentos para variable operacionales
3. Mantenimiento basado en herramientas comerciales.

Para evaluar su viabilidad técnica, se hacen 2 preguntas:

- ¿Existe una técnica de mantenimiento que sea factible u ocupable?
- ¿Es económicamente rentable?

2.5.2. TAREAS DE REACONDICIONAMIENTO / SUSTITUCION CÍCLICA.

Tareas basadas en tiempo, los equipos son revisados y/o reparados en frecuencias determinadas, sin importar su estado en el momento. Esta frecuencia es determinada por la edad a la cual el elemento o pieza exhibe un incremento rápido en la probabilidad que se genere una condición de falla.

Estas tareas pueden ser para restaurar la condición original del equipo (reacondicionamiento) o bien para sustituir las piezas o elementos del equipo, antes que estos presenten fallas(sustitución).

BUSQUEDA DE FALLOS OCULTOS.

Según lo visto en el análisis anterior, respecto a fallas que no son evidentes, estas tareas buscan determinar la frecuencia en que se deben realizar pruebas, para comprobar el funcionamiento de los equipos. Se considera técnicamente factible si reduce el riesgo de fallas múltiples y es viable implementarla con la frecuencia requerida.

2.5.3. TAREAS REACTIVAS.

NINGÚN MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Es solo valido si no se encuentra una tarea cíclica apropiada para funciones ocultas y no tiene consecuencias para la seguridad o el

medio ambiente y si no se encuentra una tarea proactiva que sea costo/eficaz para fallas con consecuencias operacionales no operacionales. Consiste principalmente a esperar al fallo y actuar de forma reactiva.

REDISEÑO

Si no se encuentra una tarea de búsqueda de fallas o mantenimiento preventivo que reduzca Los riesgos de falla múltiple y los niveles de riesgo ambiental y/o impacto en la seguridad. Incluye modificaciones en la especificación de componentes, agregado de elementos nuevos, sustitución de un equipo entero o nuevo, por otro de distinta marco o especificaciones o cambiar de lugar una máquina.

Con lo anterior se puede dar respuesta a las últimas dos preguntas planteadas en un inicio del RCM.

Con los costos asociados obtenidos de la ecuación (3) se puede discutir con mantenimiento o planificación recomendaciones de estrategias, comparando costos con respecto a costo por año de riesgo (ecuación 3) evaluando su frecuencia y efectividad, lo cual se puede incorporar al presupuesto, buscando evitar la falla. La justificación de lo anterior se puede evaluar en base a los costos, junto con factores como si subcontratar los servicios, repuestos etc.

2.6. ASPECTOS IMPORTANTES A TENER EN CUENTA

Una pregunta importante que se puede hacer es: ¿Cómo medimos los resultados obtenidos por la implantación del RCM? Para lo cual se debe siempre evaluar la situación actual, para compararla con la situación final una vez aplicada la metodología. Para lo anterior se pueden considerar indicadores como tiempos promedios operativos o tiempos promedios fuera de servicio como indicadores de mantenimiento, pero de igual manera costos por indisponibilidad por fallas, evaluando ahorros con respecto a lo esperado.

3. OBJETIVOS.

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora al plan de mantenimiento de camión Caex Komatsu 830E AC, centrado en la confiabilidad para aumentar su disponibilidad, disminuir frecuencia de fallas y los costos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer la importancia del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y del camión Komatsu 830E-AC, bajo el contexto operacional determinando la jerarquía de sus sistemas en base al riesgo que las fallas presenten.
- Jerarquizar los modos de fallo del equipo a través del análisis FMECA, para definir acciones de mantenimiento que serán parte de la propuesta.
- Elaborar la propuesta de mejora con los antecedentes y análisis, evaluando beneficios económicos.

4. APLICACIÓN.

4.1. ANTECEDENTES GENERALES

El camión Komatsu 830E-AC es un equipo diseñado para operaciones de alta producción, este equipo destaca por su capacidad, eficiencia y durabilidad, lo que lo convierte en un referente en el transporte de grandes volúmenes de material en condiciones extremas. Su diseño combina sistemas eléctricos avanzados con mecánica robusta, optimizando el rendimiento operativo.

A pesar de ser un equipo ampliamente usado en la industria minera, su principal deficiencia es el uso de llamados frenos secos o de discos, a diferencia de los frenos hidráulicos usados por la versión más moderna, el camión Komatsu 930E. Consta de los siguientes sistemas principales:

- SISTEMA TECNOLÓGICOS E INSTRUMENTACIÓN.
- SISTEMA ESTRUCTURAL
- SISTEMA DE TRACCIÓN
- SISTEMA DE SUSPENSIÓN
- SISTEMA ELECTRICO
- SISTEMAS DE PROTECCION
- SISTEMA DE GENERACIÓN
- SISTEMA HIDRAULICO

4.2. CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO

La conformación del equipo de trabajo consta de los siguientes profesionales según lo recomendado por el RCM:

- Facilitador
- Especialista
- Mantenedor
- Programador
- Ingeniero de procesos
- Operador

4.3. JERARQUIZACIÓN DEL SISTEMA

Para aplicar la matriz de criticidad se tomaron los eventos de falla de un año de antigüedad, desde octubre 2023 hasta octubre 2024, los cuales estaban agrupados en los sistemas antes mencionados y por parte del grupo se les asignaron las siguientes ponderaciones.

Frecuencia de fallas:

Cantidad	Asignación en matriz
Menos de 200 fallas al año	1 – Excelente
Entre 201 y 300 fallas al año	2 - Bueno
Entre 301 y 400 fallas al año	3 - Promedio
Entre 401 y 500 fallas al año	4 - Pobre
Sobre 501 fallas al año	5 – Muy pobre

Tabla 1-1: Asignación de frecuencia de fallas

Cantidad de fallas

Para el factor de seguridad – higiene – ambiente se toma lo siguiente (Parra y Crespo 2019)

5.- Evento catastrófico: Muerte y/o alto impacto ambiental

4.- Evento genera: Lesión incapacitante y/o afectación sensible al ambiente

3.- Evento genera: Daños menores a la integridad física y/o afectación al ambiente controlable

2.- Evento genera: Alarma potencial en seguridad y/o incidente ambiental sin repercusión sobre la normativa legal vigente.

1.- No genera ningún impacto sobre la seguridad y el ambiente

Impacto en la producción y costos de mantenimiento:

5.- Costos superiores a 1.500.000 USD.

4.- Costos entre 1.500.000 y 1.000.000 USD.

3.- Costos entre 1.000.000 y 500.000 USD

2.- Costos entre 500.000 y 100.000 USD

1. Costos Bajo los 100.000 USD

La tabla ya jerarquizada quedaría de la siguiente manera:

Denominación	FRECUENCIA FALLAS	SHA	IP-CM	CONSEC.	TOTAL	JERARQUIZACIÓN
SISTEMA HIDRAULICO	3	5	5	5	15	Muy Alta Criticidad
SISTEMA DE GENERACIÓN	3	3	5	5	15	Muy Alta Criticidad
SISTEMA ELECTRICO	5	2	3	3	15	Muy Alta Criticidad
SISTEMAS DE PROTECCION	3	4	3	4	12	Alta Criticidad
SISTEMA DE SUSPENSIÓN	4	3	3	3	12	Alta Criticidad
SISTEMA DE TRACCIÓN	1	2	4	4	4	Media Criticidad
SISTEMA TECNOLÓGICOS E INSTRUM	1	2	3	3	3	Baja Criticidad
SISTEMA ESTRUCTURAL	2	2	2	2	4	Baja Criticidad

Tabla 1-2: Jerarquización de sistemas

Con esto se tiene el sistema hidráulico, el cual consta de 3 subsistemas que son de levante dirección y freno, por alcance del trabajo se toma el sistema de freno al ser el que más aporta a la ponderación de frecuencia de falla según los registros:

SUBSISTEMA	FREC. FALLAS
Subsistema de Freno	175
SubSistema de Dirección	96
Subsistema de Levante	49
TOTAL	320

Tabla 1-3: Jerarquización de subsistemas

4.4. CONTEXTO OPERACIONAL

La norma SAE JA1012 nos define ciertos aspectos específicos en la definición del contexto operacional, los cuales son documentados y estos son:

- Proceso fluido: el activo está funcionando en un proceso continuo de transporte de material estéril y para procesar.
- Lugar de operaciones: El activo operará en faena “El Soldado” consta adentro a una altura de 1000 metros sobre el nivel del mar, con clima mediterráneo, veranos secos y calurosos con temperaturas entre 25,8 y 26 grados Celsius, e inviernos lluviosos y fríos con mínimas de 6,3 y 6,7 grados Celsius.
- Intensidad de operaciones: la faena opera 24 horas al día los 7 días de la semana, con turnos rotativos día y noche.
- Redundancia: Actualmente la flota cuenta con 14 camiones a disposición de uso por parte de operaciones.
- Trabajo-durante-operación: La magnitud de las actividades está definida por los equipos de carguío, permitiendo un sistema de relevos de 1 hora de colación del operador con el equipo, el resto del tiempo debe estar transportando material, a excepción de tiempos de entrega de turno o alguna otra contingencia.
- Repuestos: Actualmente se cuenta en faena con una bodega de Komatsu para repuestos menores, en cambio para repuestos mayores, componentes principales del sistema, se debe verificar el stock de Komatsu en Chile o el extranjero, donde los tiempos de espera pueden variar desde 1 semana a 60 días dependiendo el componente.
- Objetivos de desempeño: la operación de este equipo esta sujeta al concepto de “Extracción mina” el cual debe cumplir como compromiso, cierta cantidad de material ya sea mineral o estéril.

4.5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de frenos consta de un sistema de accionamiento completamente hidráulico. Al presionar el pedal del freno se accionan tanto los frenos de disco delanteros simples y los traseros de disco duales de velocidad inducida. Los frenos también se activan operando un interruptor en el panel de

instrumentos. Los frenos se aplicarán automáticamente si la presión del sistema cae por debajo del mínimo preestablecido.

Al accionarlos la presión hidráulica que viene desde los acumuladores, previamente llenados por la bomba de dirección y de frenos, presión que acciona los caliper, los cuales presionan un elemento de desgaste sobre los discos, para que a través de la fricción se vea reducida la velocidad.

Su ciclo de funcionamiento y componentes se ve en la siguiente imagen:

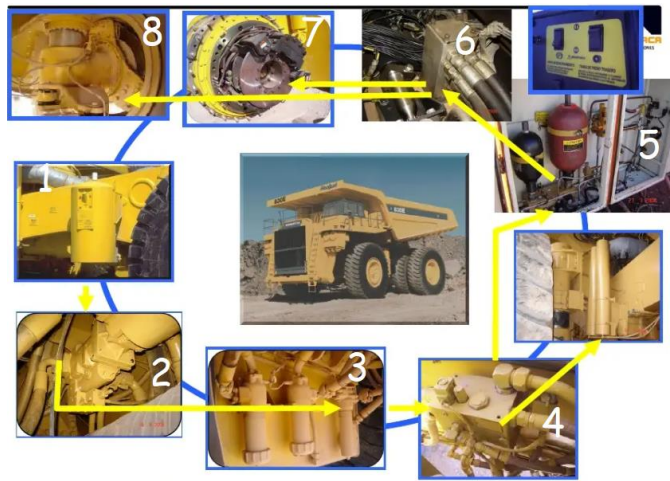


Figura 1-8: Esquema de funcionamiento sistema de freno
(Fuente: Manual instructivo de flota AA)

- 1- Estanque hidráulico
- 2- Boma de dirección/Frenos
- 3- Filtros
- 4- Múltiple de purga
- 5- Acumuladores
- 6- Válvulas
- 7- Discos traseros
- 8- Disco delantero

El estanque hidráulico (1) tiene una capacidad de 946 litros, suministra aceite hidráulico a la bomba de pistones axiales (2) la cual da caudal a los sistemas de dirección y freno, una vez que pasa por la bomba, sigue por la estación de filtrado (3) para

posteriormente pasar por el múltiple de purga(4) hacia los acumuladores de dirección y de freno (5) a una presión de 310 kPa, desde los acumuladores de alimenta el múltiple de válvulas (6) las cuales distribuyen la presión hacia los distintos caliper ya sea traseros dobles (7) o delanteros simples(8)

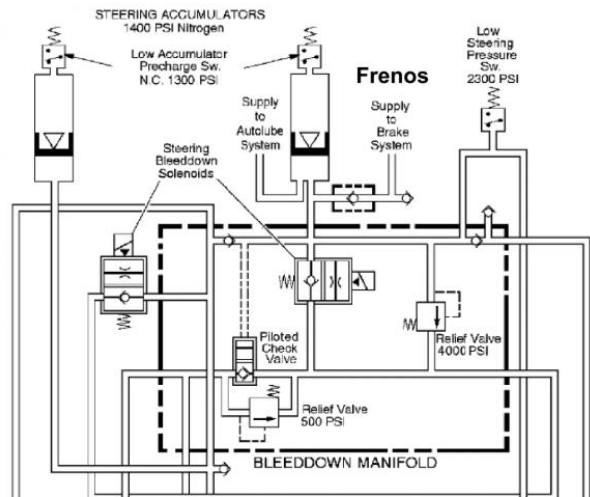


Figura 1-9: diagrama del sistema de freno. (Fuente: Manual operación/mantenimiento Komatsu 830E-AC)

Como se puede apreciar del diagrama, estos tienen un resorte de retorno, los cuales se accionan ante una baja en la presión del sistema.

4.4. DIAGRAMA DE ENTRADA PROCESO SALIDA

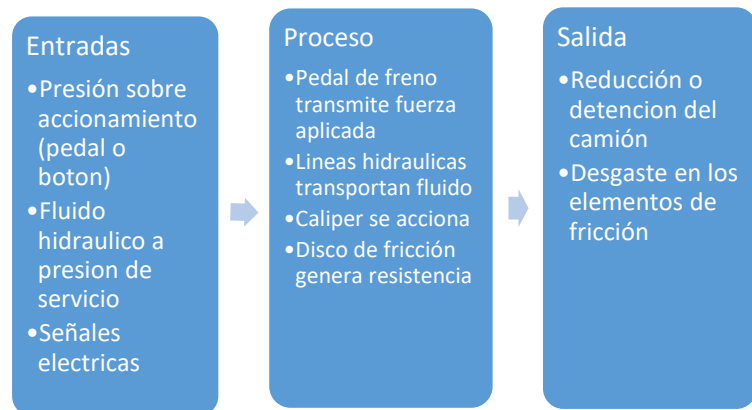


Figura 1-10: Diagrama Entrada Proceso Salida. (Fuente: Elaboración propia)

4.6. DEFINICIÓN DE FUNCION Y FALLAS FUNCIONALES

Función: Reducir la velocidad del camión dentro de una distancia específica y bajo condiciones operativas normales, de manera proporcional al accionamiento del pedal o interruptor.

Falla total: no reducir la velocidad del camión dentro de una distancia específica ni de manera proporcional al accionamiento de los mandos

Falla parcial: reducir de manera retardada, desproporcionada y descontrolada la velocidad del equipo.

4.7. MODOS DE FALLA

#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPPR (horas)	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
1.1	Válvula solenoide de freno defectuosa	1,8	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Alarma en panel de error Acción correctiva: Cambio de comp.	6	\$ 127	\$ 4.710	\$ -	\$ 3.850
1.2	Obstrucción en las líneas hidráulicas	11	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Alarma en panel de error Acción correctiva: Revisión de presiones y limpieza	8	\$ 127	\$ 370	\$ -	\$ 15.246
1.3	Pérdida de hermeticidad en sello interno de bomba	3	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Baja presión en el sistema Acción correctiva: Inspección y Cambio de retenes y sellos	12	\$ 127	\$ 1.387	\$ -	\$ 8.733
1.4	Rotura de mangueras flexibles	13	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): baja presión en el sistema Acción correctiva: Cambio de comp.	4	\$ 127	\$ 309	\$ -	\$ 10.621
1.5	Falla interna en bomba hidráulica	1,5	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Alarma y posterior detención Acción correctiva: Cambio de comp.	12	\$ 127	\$ 16.569	\$ -	\$ 27.140
1.6	Válvula solenoide de purga sin funcionamiento	2	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Alerta en el panel de error Acción correctiva: Cambio de comp.	6	\$ 127	\$ 4.327	\$ -	\$ 10.178
1.7	Baja presión en acumulador	13	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Baja presión de freno Acción correctiva: Inspección y cambio de sellos	8	\$ 127	\$ 449	\$ -	\$ 19.045
1.8	Sobrecarga en fusible de 10 amp de circuito de freno	3	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Alerta en panel de errores Acción correctiva: Cambio de comp.	2	\$ 127	\$ 180	\$ -	\$ 1.302
1.9	Relee de sistema de advertencia defectuoso	5	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Alerta en panel de errores Acción correctiva: Cambio de comp.	2	\$ 127	\$ 157	\$ -	\$ 2.055
1.10	Cortocircuito en sistema eléctrico	4	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: SI Efecto operacional (síntomas): Alerta en panel de errores Acción correctiva: Revisión de sistemas de protección	6	\$ 127	\$ 257	\$ -	\$ 4.076

Tabla 1-4 Modos de falla total.

#	Modo de falla	Frecuencia de eventos por año fallas/año	Efecto de Falla	TPPR (horas)	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año
2.1	Traspaso interno en pistón de accionamiento	6	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Baja presión de freno. Acción correctiva: Cambio de sellos o componente	12	\$ 127	\$ 1.320	\$ -	\$ 17.064
2.2	Caliper atascado	8	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Inestabilidad en el freno. Acción correctiva: Limpieza y lubricación	8	\$ 127	\$ 223	\$ -	\$ 9.912
2.3	Pérdida de hermeticidad en uniones	9	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Baja presión de freno Acción correctiva: Inspección y cambio de sellos	8	\$ 127	\$ 632	\$ -	\$ 14.832
2.4	Mecánica del pedal atascada	13	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Dificultad en el accionamiento Acción correctiva: Cambio de componente	4	\$ 127	\$ 965	\$ -	\$ 19.149
2.5	desgaste en los discos de freno delanteros	1,8	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Mayor recorrido de pedal Acción correctiva: Cambio de componente	24	\$ 127	\$ 15.723	\$ -	\$ 33.788
2.6	desgaste en los discos de freno traseros	1,6	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Mayor recorrido de pedal/frenado irregular Acción correctiva: Cambio de componente	24	\$ 127	\$ 117.300	\$ -	\$ 192.557
2.7	desgaste en los elementos de frenado(balatas)	20	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Mayor recorrido de pedal/frenado irregular Acción correctiva: Cambio de componente	10	\$ 127	\$ 758	\$ -	\$ 40.560
2.8	filtros saturados	11	Evidente / No evidente: No evidente Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Baja presión de freno Acción correctiva: Cambio de componente	4	\$ 127	\$ 578	\$ -	\$ 11.946

Tabla 1-5 Modos de falla parcial.

#	Modo de falla	Tiempo promedio para reparar	Costos repuestos + insumos	Costos manos de obra	Total
1.1	Válvula solenoide de freno defectuosa	6	\$ 4.609	\$ 101	\$ 4.710
1.2	Obstrucción en las líneas hidráulicas	8	\$ 235	\$ 135	\$ 370
1.3	Pérdida de hermeticidad en sello interno de bomba	12	\$ 1.185	\$ 202	\$ 1.387
1.4	rotura de mangueras flexibles	4	\$ 242	\$ 67	\$ 309
1.5	Falla interna en bomba hidráulica	12	\$ 16.367	\$ 202	\$ 16.569
1.6	Válvula solenoide de purga sin funcionamiento	6	\$ 4.226	\$ 101	\$ 4.327
1.7	baja presión en acumulador	8	\$ 314	\$ 135	\$ 449
1.8	sobrecarga en fusible de 10 amp de circuito de freno	2	\$ 146	\$ 34	\$ 180
1.9	Relee de sistema de advertencia defectuoso	2	\$ 123	\$ 34	\$ 157
1.10	cortocircuito en sistema eléctrico	6	\$ 156	\$ 101	\$ 257
2.1	Traspaso interno en pistón de accionamiento	12	\$ 1.118	\$ 202	\$ 1.320
2.2	Caliper atascado	8	\$ 88	\$ 135	\$ 223
2.3	Pérd. de herm. uniones	8	\$ 497	\$ 135	\$ 632
2.4	Mecánica del pedal atascada	4	\$ 898	\$ 67	\$ 965
2.5	desgaste en los discos de freno delanteros	24	\$ 15.319	\$ 404	\$ 15.723
2.6	desgaste en los discos de freno traseros	24	\$ 116.896	\$ 404	\$ 117.300
2.7	desgaste en los elementos de frenado(balatas)	10	\$ 590	\$ 168	\$ 758
2.8	filtros saturados	4	\$ 511	\$ 67	\$ 578

Tabla 1-6: Detalle de costos.

Costo HH Mecánico/lubricador/ Electrico x 1 hora (Dolares)	\$16,83
Costo HH Especialista x 1 hora(Dolares)	\$18,82
Costos HH Mantenedor Predictivo x 1 hora(Dolares)	\$22,18

Tabla 1-7: Detalle de costos de hora hombre.

4.8. PROPUESTA DE TAREAS

#	Modo de falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del MCC	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación (horas de funcionamiento)	Responsable	Costos del plan Anual (dolares)
1.1	Válvula solenoide de freno defectuosa	Tarea Preventiva (reemplazo programado)	Cambio de componente, antes de que cumpla vida útil	5000	1.- Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecucion	\$ 4.710
1.2	Obstruccion en las líneas hidráulicas	Tarea Preventiva (reacondicionamiento ciclico)	Limpieza de líneas y componentes de transporte (flexibles, válvulas menores)	500	1.- Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecucion	\$ 2.691
1.3	Pérdida de hermeticidad en sello interno de bomba	Tarea Preventiva (reemplazo programado)	Revisión de fugas de lubricante y cambio por horas de servicio	2000	1.- Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecución 3.-Operaciones: Revisión antes de uso (Vuelta del perro)	\$ 918
1.4	Rotura de mangueras flexibles	Tarea Preventiva (Reemplazo programado)	Programa de cambio de mangueras por sectores de acuerdo a presiones y cargas de trabajo	500	1.- Supervisión/ Confiabilidad: Levantamiento de prioridades 2.- Planificación : Asignación de recursos 3.-Mantenión: Ejecucion	\$ 2.678
1.5	Falla interna en bomba hidráulica	Tarea Predictiva (monitoreo de condición)	Analisis de aceite y termográfico	250	1.- Confiabilidad: Definir prioridades y listado 2.-Planificación : Asignación de recursos 3.-Laboratorio: Ejecución	\$ 909
1.6	Válvula solenoide de purga sin funcionamiento	Tarea Preventiva (reemplazo programado)	Cambio de componente, antes de que cumpla vida útil	5000	1.- Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecución	\$ 4.428
1.7	Baja presión en acumulador	Tarea preventiva (Reacondicionamiento ciclico)	Inspeccion periodica, revisión de empaquetaduras y sellos	500	1.- Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecución 3.-Operaciones: Revisión antes de uso (Vuelta del perro)	\$ 2.323
1.8	Sobrecarga en fusible de 10 amp de circuito de freno	Tarea Preventiva (revisión programada)	Pauta de mantención electrica	2000	1.-Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecución	\$ 111
1.9	Relee de sistema de advertencia defectuoso	Tarea Preventiva (revisión programada)	Pauta de mantención electrica	2000	1.-Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecución	\$ 165
1.10	Cortocircuito en sistema electrico	Tarea Preventiva (reacondicionamiento ciclico)	Revisión de líneas de alimentación y tableros involucrados	250	1.-Planificación : Asignación de recursos 2.-Mantenión: Ejecución	\$ 2.727

Tabla 1-8: Propuesta de tareas en falla principal.

#	Modo de falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del MCC	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación (horas de funcionamiento)	Responsable	Costos del plan Anual (dolares)
2.1	Traspaso interno en pistón de accionamiento	Tarea Preventiva (reemplazo programado)	Cambio de sellos internos de pistón	5000	1.-Planificación: Asignación de recursos 2.-Mantenición: Ejecución	\$ 338
2.2	Caliper atascado	Tarea Preventiva (reacondicionamiento ciclico)	Inspección del componente, limpieza, lubricación y ajuste	1000	1.-Planificación: Asignación de recursos 2.-Mantenición: Ejecución	\$ 1.338
2.3	Pérdida de hermeticidad en uniones	Tarea Preventiva (reacondicionamiento ciclico)	Revision periodica por fugas, programa de cambio según horas de funcionamiento.	1000	1.- Planificación: Asignación de recursos 2.-Mantenición: Ejecución 3.-Operaciones: Revisión antes de uso (Vuelta del motor)	\$ 1.186
2.4	Mecánica del pedal atascada	Tarea Preventiva (reacondicionamiento ciclico)	Revision periodica de estado y cambio según horas de funcionamiento	500	1.-Planificación: Asignación de recursos 2.-Mantenición: Ejecución	\$ 1.629
2.5	desgaste en los discos de freno delanteros	Tarea predictiva (monitoreo de condición)	Ultrasonido de espesores y falla, periodicos	250	1.- Confiabilidad: Definir prioridades y listado 2.-Planificación: Asignación de recursos 3.-Laboratorio: Ejecución	\$ 1.818
2.6	desgaste en los discos de freno traseros	Tarea predictiva (monitoreo de condición)	Ultrasonido de espesores y falla, periodicos	250	1.- Confiabilidad: Definir prioridades y listado 2.-Planificación: Asignación de recursos 3.-Laboratorio: Ejecución	\$ 1.818
2.7	desgaste en los elementos de frenado(balatas)	Tarea Preventiva (reemplazo programado)	Inspeccion periodica, programación de cambio controlado	250	1.-Planificación: Asignación de recursos 2.-Mantenición: Ejecución	\$ 7.479
2.8	filtros saturados	Tarea Preventiva (reemplazo programado)	Incluir Cambio de componente en mantención programada	500	1.-Planificación: Asignación de recursos 2.-Mantenición: Ejecución	\$ 6.985
Costo total anual de la propuesta						\$ 44.251

Tabla 1-9: Propuesta de tareas en falla parcial.

5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Aplicada la metodología se tiene que, de los 18 modos de falla determinados, se proponen 16 tareas preventivas (9 reemplazo y 7 de reacondicionamiento) y dos tareas en base a condición.

Para poder evaluar los resultados se calcula un “ahorro potencial” a futuro, variando con este, la frecuencia de falla en 4 escenarios, y esto restándolo con los costos por riesgo/años actuales, de la siguiente manera:

- Riesgo\$/Año (Esperado/Actual):

$$FF \times (Tppr \times Imp.prod\$ /hora) + (Costos \times falla + Imp \times SHA)$$

- Ahorro potencial

Riesgo \$/año (Actual) – Riesgo esperado\$/año (Esperado)– Costos de mantención.

Lo que se busca, es evaluar cual es el impacto económico, una vez implementado el plan de mantenimiento con sus costos, previendo cuanto ahorrará la organización implementada la propuesta, con respecto a 4 casos de variación de la frecuencia de falla.

Ahorro potencial con FF actual	\$ -44.249,92
Ahorro potencial con FF actual x 0,9	\$ -16.881,69
Ahorro potencial con FF actual x 0,7	\$ 34.217,29
Ahorro potencial con FF actual x 0,5	\$ 85.316,27
Ahorro potencial con FF actual x 0,3	\$ 136.415,25

Tabla 1-10: Ahorro potencial.

Lo que nos indica la tabla 1-9 es que de mantenerse la frecuencia de fallo actual una vez aplicada la propuesta de mantenimiento, generaría un costo mayor, ya que se haría más mantenimiento, manteniendo la frecuencia de falla, pero si aplicada la propuesta de mejora, se logra bajar la frecuencia de fallo un 30%, esta empezaría a generar un ahorro para la organización.

Cabe destacar que el análisis tanto de las fallas como de los costos se efectuó considerando solamente un equipo, por lo que, al aplicar esta metodología en la flota, este ahorro se vería reflejado en los 14 equipos totales de la flota o en los equipos operativos.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró definir la importancia de la confiabilidad en los activos mineros, y la importancia de mantener planes de mantenimiento adecuados al contexto y alineados con la seguridad y el ambiente. Se pudo ver como la metodología RCM entrega diversos pasos y puntos a los que tener en cuenta a la hora de tomar decisiones con respecto al mantenimiento, conformando un grupo de trabajo con experiencia y conocimiento del equipo, desarrollando los análisis respectivos para poder definir indicadores de ahorros potenciales de acuerdo con los resultados esperados.

Con estos resultados se puede responder a las preguntas planteadas por la metodología, y responder con resultados económicamente favorables en temas de optimización del plan de mantenimiento mirando la confiabilidad.

Los hallazgos destacan que se pueden obtener resultados positivos invirtiendo recursos como tiempo y personal a las reuniones, generando una mejora económica considerable.

Sin embargo, una limitación importante es el poder incluir nuevas tecnologías en equipos no tan modernos como el de este trabajo, para lo cual siempre es recomendable incluir a proveedores especialistas o al mismo fabricante.

Futuras investigaciones podrían explorar otras flotas de esta minera, considerando su criticidad con respecto a la operación, considerando la cantidad y variedad de modelos de equipos.

Se concluye que este estudio representa un avance hacia la optimización de planes mantenimiento, donde la confiabilidad a través de la metodología RCM presenta en la actualidad mejoras.

6.1. RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir aplicando la metodología en los sistemas menos críticos del equipo.

En caso de que se quiera aplicar esta metodología en otra flota, se recomienda la flota de carguío, ya que las demás flotas tienen

equipos más variados, reduciendo el impacto económico que se pueda generar.

Se recomienda para futuras aplicaciones incluir a proveedores o personal de Komatsu, que puedan aportar en materia técnica, de repuestos, o de nuevas tecnologías.

Se recomienda antes de implementar la metodología, calcular y establecer indicadores como: Tiempo promedio operativo, tiempo promedio de buen funcionamiento, o disponibilidad, para poder medir luego de un año el cambio de estos indicadores y su relación con la implantación de esta metodología.

7. REFERENCIAS

Andrade Solorzano, Carlos & Herrera Suárez, Miguel. (2021). Análisis de la situación actual del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación. 4. 2-18. 10.46296/ig.v4i8.0021.

Barbieri, Giacomo & Hernandez, José. (2024). Sustainability Indices and RAM Analysis for Maintenance Decision Making Considering Environmental Sustainability. Sustainability. 16. 979. 10.3390/su16030979.

Bloom N, 2006. Reliability Centered Maintenance. Implementation made simple. McGraw-Hill Inc., New York.

Herrera, Alexis & Parra, Carlos. (2023). APLICACIÓN PARCIAL DE LA METODOLOGÍA RCM. CAMIÓN MINERO: Komatsu 930E-4SE. ORGANIZACIÓN: Komatsu Chile. 10.13140/RG.2.2.27625.77929.

Jones Richard, 1995. Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach, Gulf Publishing Company, First Edition, Houston, Texas.

Moubray, J. (2004). RCM II, Mantenimiento centrado en confiabilidad: Gran Bretaña: Aladon ltda

Parra, C., & Crespo, A. (2015). Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos: INGECON.

Parra, Carlos & Crespo Marquez, Adolfo. (2019). Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos. 10.13140/RG.2.2.21197.87524.

Smith, R., & Hawkins, B. (2004). Lean maintenance: reduce costs, improve quality, and increase market share: Elsevier

Society of Automotive Engineers. (2002). Una guía para la norma de mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) (SAE Standard JA1011). SAE international

Society of Automotive Engineers. (1999). Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) (SAE Standard JA1012). SAE international

UNE. (2018). Mantenimiento. Terminología del mantenimiento. (UNE-EN13306:2018) <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-13306-2018-n0060338>

Vega Mendoza, P. J. (2013). Diseño de la Estrategia de Mantenimiento Basada en la Confiabilidad, RCM e inspección Basada en el Riesgo, RBI, para la línea Crítica de Producción de la Empresa ITALCOL SCA Ubicada en Girón, Santander.