

Optimización del plan de mantenimiento de la pala hidráulica Komatsu PC5500 de acuerdo con metodología RCM2

Nombre: Enmanuel Sandoval V.

Profesor guía: Luis Gutiérrez M.

Universidad: Universidad Técnica Federico Santa María



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: Optimización del plan de mantenimiento de la pala hidráulica Komatsu PC5500 de acuerdo con metodología RCM2

Nombre del candidato(a): Enmanuel Alejandro Sandoval Venegas

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial con licenciatura en ingeniería

Campus: Viña del mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Luis Gutiérrez Meneses, 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: 24/03/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24/03/2026

Firma: Enmanuel

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.

Contenido	
Capítulo 1.....	9
Introducción	6
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos	10
Indicadores de producción y flowsheet	11
Flowsheet del sistema de carguío:	12
Descripción del equipo	13
Características generales.....	14
Descripción funcional	15
Modos de falla del equipo.....	19
Capítulo 2.....	22
Introducción al análisis Jack Knife.....	23
Datos cuantitativos por modo de falla para el diagrama Jack Knife.....	24
Construcción del diagrama Jack Knife	24
Interpretación del diagrama Jack Knife	27
Interpretación por cuadrantes.....	27
Análisis por modo de falla según cuadrante del diagrama Jack Knife.....	28
Resumen interpretativo general de Jack Knife	34
Jerarquización de modos de falla del equipo	35
Gráfico simple Jack Knife (ayuda visual).....	36
Jerarquización de modo de falla según diagrama Jack Knife.....	36
Selección del modo de falla para intervenir	37
Modo de falla seleccionado.....	38
Justificación del enfoque.....	38
Capítulo 3.....	40
Aplicación de la metodología RCM 2 sobre el modo de falla priorizado.....	41
Modo de falla seleccionado para aplicar RCM2	42

Selección del modo de falla a analizar.....	43
Análisis de consecuencias del modo de falla MF1.1.....	43
Descripción del modo de falla MF1.1.....	44
Evaluación de consecuencias según RCM2.....	45
Aplicación del árbol de decisiones RCM2.....	46
Interpretación del resultado del árbol de decisiones	48
Definición de la tarea de mantenimiento para el modo de falla MF1.1	49
Definición de la frecuencia	49
Validación técnica	50
Validación económica	50
Desarrollo del plan de mantenimiento propuesto para el modo de falla MF1.1.....	51
Descripción general del plan propuesto.....	51
Justificación del plan propuesto	52
Comparación conceptual entre la situación actual y el plan de mantenimiento propuesto.....	53
Situación actual del mantenimiento (antes de RCM2)	53
Situación con el plan de mantenimiento propuesto (RCM2)	54
Tabla de comparación entre situación actual y plan propuesto	54
Interpretación técnica	54
Definición de la tarea de mantenimiento.....	55
Descripción técnica de la tarea	55
Frecuencia de ejecución	56
Responsable y nivel de intervención.....	56
Impacto esperado de la tarea.....	56
Tabla resumen de la tarea de mantenimiento RCM2.....	57
Verificación económica de la tarea de mantenimiento seleccionada	58
Tabla de verificación económica simple	58
Impacto esperado del plan de mantenimiento propuesto	59
Situación base.....	59
Escenario esperado con la aplicación del plan RCM2	60

Comparación base vs escenarios de mejora	60
Impacto esperado sobre indicadores de mantenimiento	61
Alcance de la comparación económica	62
Alcances y limitaciones del estudio	62
Conclusiones.....	64
Recomendaciones.....	66
Alcances y proyecciones del estudio	68
Anexos.....	69
Referencias.....	69

Introducción

En la industria minera los equipos de carguío representan un eslabón esencial dentro del proceso productivo. La eficiencia de la operación depende en gran medida de la disponibilidad y confiabilidad de esos equipos, los cuales trabajan en condiciones de alta exigencia mecánica, térmica y ambiental.

Entre los equipos más relevantes se encuentra la pala hidráulica Komatsu PC5500, utilizada en faenas a rajo abierto para el carguío de material fragmentado hacia camiones mineros de gran capacidad. Su desempeño influye directamente en la continuidad de la producción y en los costos operacionales asociados.

El mantenimiento adecuado de estos equipos es un factor determinante para asegurar su rendimiento. La aplicación de metodologías modernas como el RCM2 (Reliability Centered Maintenance) permite analizar de manera sistemática las funciones del equipo, identificar modos de falla, priorizarlos y definir tareas de mantenimiento efectivas, optimizando recursos y reduciendo el riesgo de fallas no programadas.

El presente trabajo tiene como propósito optimizar el plan de mantenimiento de la pala Komatsu PC 5500 mediante la metodología RCM2, con el fin de establecer estrategias de mantenimiento más confiables y costo efectivas que aseguren la continuidad operativa del proceso minero.

Sin embargo, a pesar de la criticidad del equipo, el plan de mantenimiento actual de la pala hidráulica Komatsu PC 5500 presenta limitaciones en la identificación y control de los modos de falla más críticos, lo que se traduce en detenciones no planificadas recurrentes, elevados tiempos de reparación, generando un impacto significativo en la disponibilidad

operacional del equipo. El análisis preliminar de los registros de mantenimiento evidencia que ciertos modos de falla concentran una proporción relevante de las horas de indisponibilidad anual, afectando directamente la continuidad del proceso de carguío y generando costos operacionales elevados asociados a pérdidas de producción y reparaciones no planificadas.

El análisis de los registros históricos de operación y mantenimiento de la pala hidráulica Komatsu PC5500 y evidencia que determinados modos de falla concentran una proporción significativa de la indisponibilidad anual del equipo. En particular, el modo de falla MF 1.1 presenta una recurrencia elevada y un tiempo medio de reparación considerable, concentrando aproximadamente 360 horas de indisponibilidad anual, lo que representa una fracción relevante de la pérdida de disponibilidad del equipo. Esta condición se traduce en una disminución directa de las horas efectivas de producción y en un aumento de los costos operacionales asociados a detenciones no planificadas.

Adicionalmente, es posible realizar una estimación económica de referencia del impacto asociado a estas detenciones. De acuerdo con antecedentes operacionales utilizados en la faena, un ciclo de transporte de un camión CAEX representa aproximadamente USD 8500 en valor de producción. Considerando un ritmo de carguío cuatro del orden de 5 a 10 minutos por camión, una detención de la pala puede implicar la pérdida de entre 6 y 12 ciclos por hora, lo que corresponde a un impacto económico estimado del orden de USD 50000 por hora de detención. Este valor se representa únicamente como una referencia del orden de magnitud, dependiente de la configuración operacional de la flota.

En este contexto, se hace necesario aplicar una metodología estructurada que permite identificar, priorizar y tratar de forma efectiva los modos de falla más críticos. La

metodología RCM2 se presenta como una herramienta adecuada para abordar este problema, al permitir definir tareas de mantenimiento técnicamente justificadas y económicamente viables, orientadas a reducir la indisponibilidad y los costos asociados.

El presente trabajo se limita al análisis y optimización del plan de mantenimiento de la pala hidráulica Komatsu PC 5500 mediante la aplicación de la metodología RCM2 sobre un modo de falla crítico seleccionado a partir del diagrama Jack Knife. El estudio se enfoca en el sistema hidráulico, especialmente en el modo de falla MF1.1, sin abordar una reestructuración completa del plan de mantenimiento del equipo y la implementación práctica del plan propuesto en operación real.

Capítulo 1

Objetivo general

- Proponer una estrategia de mantenimiento de la pala hidráulica Komatsu PC 5500 mediante la aplicación de la metodología RCM2, en sus modos de falla de alta criticidad, con el fin de evaluar su impacto en la disponibilidad operacional y en los costos asociados a detenciones no programadas.

Objetivos específicos

- Caracterizar el desempeño operacional de la pala hidráulica Komatsu PC 5500 mediante indicadores de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos, para establecer el estado base de su comportamiento dentro del proceso productivo.
- Jerarquizar los modos de falla del equipo utilizando el diagrama Jack Knife, con el propósito de determinar aquellos con mayor impacto sobre la disponibilidad operacional.
- Elaborar las tareas de mantenimiento para los modos de falla críticos identificados mediante la metodología RCM2, evaluando técnica y económicamente su impacto en la disponibilidad del equipo.

Indicadores de producción y flowsheet

La pala hidráulica Komatsu PC 5500 es un equipo de gran relevancia dentro del proceso de carguío minero, ya que su desempeño incide directamente en la productividad global y en la continuidad operativa del sistema de extracción y transporte, y el análisis de su comportamiento se realiza a través de indicadores de producción y mantenimiento los cuales permiten cuantificar su eficiencia, confiabilidad y disponibilidad.

De acuerdo con los registros operacionales reales entregados por la minera correspondiente al desempeño anual la pala Komatsu PC 5500 se obtuvieron los siguientes indicadores consolidados. (ISO 14224, 2016) (Komatsu Chile S.A., 2024)

Tabla 1: Indicadores de mantenimiento de la pala Komatsu PC5500

Indicador	Descripción	Valor (PC5500)	Comentario
Disponibilidad (%)	% de tiempo disponible	90,9 %	Calculado con MTBF/MTTR reales.
MTBF (h)	Tiempo medio entre fallas	75,7 h	Dato anual real
MTTR (h)	Tiempo medio de reparación	7,5 h	Dato anual real
Costos consumibles – filtros	Prorrato por hora de MP	≈ 6,3 (USD)/h ≈ 7173 (CLP)/h¹	Usando el total anual 43.036.966 CLP/6.000 h.

Tabla 1: Indicadores de mantenimiento de la pala Komatsu PC5500

Los valores anteriores representan los indicadores reales de desempeño de la pala Komatsu PC 5500 durante el período analizado, y permiten establecer una línea base precisa para la aplicación de la metodología RCM 2. (Komatsu Chile S.A., 2024)

Estos datos reflejan condiciones reales de operación en faena, y servirán para evaluar la efectividad del mantenimiento actual y determinar oportunidades de mejora en el nuevo plan de mantenimiento.

Flowsheet del sistema de carguío:

Dentro del proceso productivo minero, la pala hidráulica Komatsu PC 5500 participa directamente en la etapa de carguío, asegurando el flujo continuo de material hacia las etapas posteriores del proceso. El flowsheet general del proceso minero a rajo abierto puede representarse de la siguiente manera:

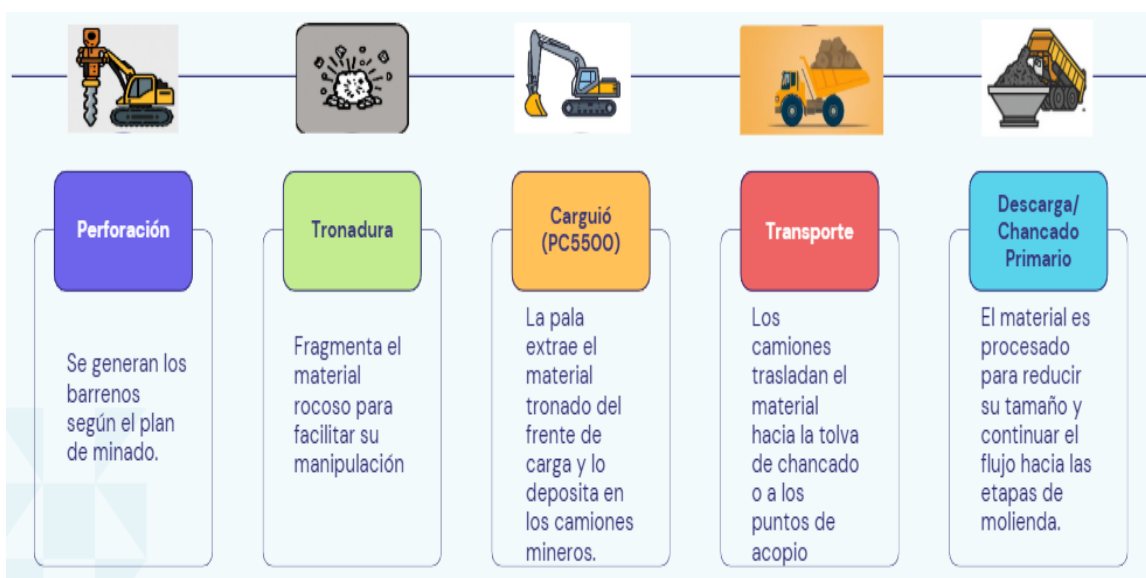


Figura 1: Proceso de operación minera

La pala Komatsu PC 5500 constituye el nexo crítico entre la tronadura y el transporte, ya que su rendimiento determina el equilibrio de todo el circuito productivo. Una disminución en su disponibilidad o eficiencia operativa provoca una reducción inmediata en la tasa de producción global y un aumento en los costos unitarios por tonelada movida. Por esta razón, su mantenimiento debe ser gestionado mediante metodologías basadas en

confiabilidad (RCM2), priorizando el modo de falla de mayor impacto y estableciendo planes de intervención que optimicen la disponibilidad operacional y minimicen las detenciones no programadas. (Komatsu Chile S.A., 2024)

Descripción del equipo



Figura 2: Excavadora Komatsu PC5500 en operación

La pala hidráulica Komatsu PC 5500 es un equipo de carguío de gran porte, diseñado especialmente para operaciones mineras a cielo abierto. Se caracteriza por su alta capacidad de excavación, robustez estructural y eficiencia en ciclos de trabajo continuos, lo que la convierte en una de las máquinas más utilizadas en la minería a gran escala para el movimiento de material estéril o mineral. Este modelo pertenece a la gama de palas hidráulicas de minería de Komatsu, y se encuentra disponible en versiones diésel y eléctrica, dependiendo de las necesidades de la faena. En este caso, la versión diésel equipada con 2 motores Komatsu SDA12V159E-2 es la más común en operaciones a rajo

abierto por su autonomía y facilidad de traslado entre frentes de trabajo. (Komatsu Ltd.

(s.f.).)

Características generales

Parámetro	Especificación aproximada
Peso operativo	533 toneladas
Capacidad de balde	29 m ³ (dependiendo del tipo de material)
Potencia total instalada	2 × 1.120 kW (3.000 HP en total)
Tipo de motor	Komatsu SDA12V159E-2 (12 cilindros en V, diésel)
Capacidad de carga por ciclo	55 – 60 toneladas
Radio máximo de excavación	19,6 m
Profundidad máxima de excavación	7,4 m
Altura máxima de descarga	12,2 m
Sistema hidráulico	Circuito cerrado, controlado electrónicamente
Presión máxima del sistema	310 bar
Capacidad de tanque hidráulico	~4.000 litros
Capacidad de tanque de combustible	~9.000 litros
Orugas	Doble oruga con zapatas de acero endurecido
Cabina	Presurizada, climatizada, con sistemas de monitoreo y control electrónico

Tabla 2: Especificaciones técnicas de la excavadora Komatsu PC5500

(Komatsu Chile S.A., 2024)

Descripción funcional

La Komatsu PC 5500 está diseñada para realizar el carguío del material fragmentado hacia camiones mineros de gran capacidad, completando de cuatro a 5 pases por camión, dependiendo del tipo de material. Su ciclo de trabajo se compone de 5 fases principales:

1. Penetración: el balde corta el material en el frente de carga.
2. Excavación: el operador eleva el balde utilizando los cilindros hidráulicos del brazo y la pluma.
3. Giro: la superestructura gira para posicionar el balde sobre la tolva del camión.
4. Descarga: el balde se abre, pasando el material en el camión.
5. Retorno: la pala vuelve a su posición inicial para iniciar un nuevo ciclo.

Cada ciclo dura entre 30 y 40 segundos, dependiendo de la habilidad del operador, el tipo de material y las condiciones del terreno. (Komatsu Chile S.A., 2024)

Principales sistemas

1. Sistema hidráulico

Es el núcleo funcional de la pala. Se compone de bombas principales, válvulas de control, cilindros, acumuladores y líneas de alta presión.

Su función es transmitir la potencia generada por los motores diésel hacia los actuadores hidráulicos que controlan el brazo, la pluma, el balde, el giro y la translación.

Este sistema trabaja con presiones de hasta 310 bar, y cuenta con un circuito de filtrado y enfriamiento que mantiene la temperatura y limpieza del aceite dentro de rango seguros.

(Komatsu Chile S.A., 2024)

2. Sistema estructural

La estructura principal está compuesta por chasis inferior (tren de rodado), superestructura y equipo de trabajo (pluma, brazo y balde).

Los componentes estructurales están fabricados con acero de alta resistencia y refuerzos en las zonas de mayor carga, como las uniones del brazo y la pluma.

Este sistema soporta las fuerzas dinámicas generadas durante la excavación y el giro, siendo común el monitoreo de fisuras y deformaciones mediante inspecciones visuales y ensayos no destructivos (NDT). (Komatsu Chile S.A., 2024)

3. Sistema eléctrico y electrónico

Incluye los sistemas de arranque con sistema de carga, iluminación, instrumentación y control.

Los principales componentes son el alternador batería, arneses eléctricos, sensores de presión y temperatura, y el sistema de monitoreo Komtrax plus, que registra y transmite información sobre el rendimiento, alarmas y horas de servicio del equipo. Este sistema es vital para el diagnóstico de fallas y la gestión del mantenimiento preventivo. (Komatsu Chile S.A., 2024)

4. Sistema de traslación

Permite el desplazamiento del equipo mediante un tren de orugas impulsado por motores hidráulicos y reductores finales.

Las orugas están diseñadas para distribuir el peso del equipo y soportar terrenos irregulares, con zapatas de acero endurecido.

Este sistema requiere lubricación continua y una tensión de cadena correcta para evitar desgastes prematuros. (Komatsu Chile S.A., 2024)

5. Sistema de giro

Compuesto por el aro de giro, motores hidráulicos y reductores.

Su función es permitir el movimiento rotacional de la superestructura, garantizando precisión y estabilidad durante la descarga del material.

El aro de giro es un componente crítico por su alto costo y por estar sometido a cargas radiales y axiales intensas, por lo que requiere lubricación permanente mediante el sistema de auto lube. (Komatsu Chile S.A., 2024)

6. Sistema de lubricación automática

Se encarga de suministrar grasa a puntos críticos (pasadores, bujes rodamientos, aro de giro, etc.) De manera automática, mediante líneas y boquillas distribuidas por todo el equipo.

La falla de este sistema puede provocar desgaste acelerado y pérdidas de vida útil de los componentes móviles, por lo que un monitoreo constante es esencial. (Komatsu Chile S.A., 2024)

7. Sistema de potencia

El sistema de potencia está formado por 2 motores diésel Komatsu SDA12V159E-2, Que proporcionan la energía mecánica necesaria para accionar las bombas hidráulicas.

Estos motores incorporan sistemas de refrigeración por agua, filtrado de combustible, turbo alimentación y control eléctrico.

Su mantenimiento incluye control de temperatura, presión de aceite, limpieza de radiadores y análisis de fluidos. (Komatsu Chile S.A., 2024)

8. Cabina del operador

La cabina está presurizada y climatizada, equipada con asientos ergonómicos, joystick de control electrohidráulico y pantallas de monitoreo.

Incluye sistemas de seguridad visual y Sonora, cámara de retroceso y alarmas que permiten al operador controlar el funcionamiento del equipo y detectar condiciones anómalas.

Importancia operativa

La Komatsu PC 5500 es considerada un equipo crítico dentro del proceso de extracción y Carguío.

Su parada no programada implica la detención directa de una línea completa de transporte de mineral, generando pérdidas de miles de toneladas por hora como referencia económica, un ciclo de transporte CAEX equivale a USD 8500 en valor de producción. Por lo tanto, una detención de la pala puede implicar la pérdida de 6 a 12 ciclos por hora (según el ritmo de carguío), equivalente a USD 50000 por hora de detención, por esta razón, su mantenimiento debe estar planificado bajo metodologías basadas en confiabilidad (RCM2), priorizando el modo de falla de mayor impacto en la disponibilidad y en los costos de operación. (Komatsu Chile S.A., 2024)

Modos de falla del equipo

En la siguiente tabla se presenta el análisis FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) desarrollado para la pala hidráulica Komatsu PC 5500, conforme a las normas IEC 60812:2018 e ISO 14224:2016.

Este análisis se identifica la función principal del equipo, junto con las fallas funcionales asociadas y los modos de falla específicos ordenados por sistema (hidráulico, combustible, motor, lubricación y giro).

A diferencia de enfoques tradicionales, los modos de falla incorporan criterio cuantitativo y observables como diferencias de presión caída de flujo o niveles de restricción los cuales permiten una detección más precisa durante la operación o las inspecciones programadas.

Los parámetros utilizados corresponden a valores reales de referencia establecidos en manuales técnicos de Komatsu y literatura industrial (Cummins, Parker, Donaldson, Lincoln SKF e ISO aplicable a filtración y lubricación de maquinaria pesada).

La tabla presentada a continuación tiene como objetivo sistematizar los modos de falla identificados, junto con sus efectos, causas y parámetros asociados, permitiendo establecer una base estructurada para su posterior análisis y priorización.

(IEC 60812, 2018) (ISO 14224, 2016)

Función		Falla funcional		Sistema	Modo de falla		Efecto de falla
F1	Ejecutar el ciclo de carguío de material hacia los camiones, entregando caudal hidráulico y potencia suficientes para mantener el rendimiento o y la operación segura bajo condiciones normales. Diferencial de presión en filtros hidráulicos $\Delta P \leq 1,5$ bar, Restricción en admisión de aire ≤ 20 kPa y presiones y temperaturas dentro de rangos operativos normales.	FF 1	No cumple el ciclo de carguío con el rendimiento requerido (baja productividad o detención del sistema). Diferencial de presión en filtros hidráulicos $\Delta P > 1,5$ bar, Restricción en admisión de aire > 20 kPa	Hidráulico	M F1 .1	Obstrucción parcial de filtros hidráulicos ($\Delta P > 1,5$ bar).	Caída de presión, pérdida de caudal, movimientos lentos, \uparrow temperatura del aceite.
					M F1 .2	Saturación/contaminación de respiraderos del tanque (presencia de partículas/agua en inspección o análisis de aceite).	Contaminación del fluido, desgaste de válvulas/bombas, incremento de paradas.
					M F1 .3	Filtro de succión restringido (>30 % de pérdida de flujo o cavitación audible).	Cavitación, ruido en bomba, vibraciones y sobrecalentamiento.
				Combustible	M F1 .4	Filtro primario/secundario de combustible saturado ($\Delta P > 0,8$ bar o alarma de restricción).	Caída de presión de combustible, pérdida de potencia, tironeos o paro de motor.
				Admisión de aire	M F1 .5	Filtro de aire saturado (restricción > 20 kPa o indicador en rojo).	Menor flujo de aire, \uparrow T° de admisión, derate (reducción automática de potencia).
		FF 2	No mantiene condición segura de operación (riesgo de daño mecánico o pérdida de seguridad). Presión de aceite motor $< 1,5$ bar, falta de lubricación puntos críticos (> 40 % sin flujo)	Lubricación/Motor	M F2 .1	Filtro de aceite colapsado (by-pass activado; presión de aceite $< 1,5$ bar o alarma baja presión).	Fricción interna, sobrecalentamiento, daño severo de motor/paro de emergencia.
				Lubricación centralizada	M F2 .2	Obstrucción en líneas/boquillas (>40 % de puntos sin flujo en verificación).	Falta de engrase en pasadores/aro de giro, desgaste acelerado, posible traba de giro.
				Giro (slew)	M F2 .3	Contaminación/obstrucción en filtros o respiraderos (fino/grasa endurecida; \uparrow torque de giro).	Vibración y \uparrow temperatura en giro, daño de aro de giro, detención del equipo.

(Komatsu Chile S.A., 2024) (Komatsu Ltd. (s.f.)) (IEC 60812, 2018) (ISO 14224, 2016)

Tabla 3: Análisis FMECA de la pala Komatsu PC5500

Como se observa en la tabla FMECA, las principales fallas funcionales identificadas asocian directamente a pérdida de rendimiento operativo o a la degradación de condiciones seguras de operación.

Los modos de falla más recurrentes, principalmente obstrucciones, saturaciones y contaminación en los sistemas hidráulicos, de combustible y lubricación, impactan directamente en los indicadores de desempeño del equipo, reflejándose en una disminución del MTBF, un incremento del MTTR y, en consecuencia, en una reducción de la disponibilidad operacional.

Asimismo, estos modos de falla generan costos operacionales elevados debido a detenciones no planificadas, mayores tiempos de reparación y de gastos acelerados de componentes críticos, lo que refuerza su relevancia desde el punto de vista económico.

Este análisis se establece la relación entre los modos de falla identificados y los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos, constituyendo la base técnica para la posterior aplicación de la metodología RCM2.

En este contexto, el análisis FMECA se desarrolló de manera global sobre los principales sistemas del equipo, con el propósito de identificar y caracterizar la totalidad de los modos de falla relevantes.

Posteriormente, se emplea el diagrama Jack Knife como herramienta de priorización, permitiendo jerarquizar los modos de falla en función de su frecuencia y tiempo medio de reparación (MTTR), y seleccionar aquellos de mayor criticidad para su análisis detallado mediante la metodología RCM2.

Capítulo 2

Introducción al análisis Jack Knife

En el capítulo uno se identificaron la función principal de la pala hidráulica Komatsu PC 5500, sus fallas funcionales y los modos de falla más relevantes mediante un análisis FMECA.

En el presente capítulo se avanza desde esa descripción cualitativa hacia un diagnóstico cuantitativo de las fallas, con el fin de cumplir el siguiente objetivo específico del trabajo:

“Identificar y jerarquizar los modos de falla del equipo utilizando el diagrama Jack Knife, con el propósito de determinar aquellos con mayor impacto sobre la disponibilidad operacional.”

Para esto se utiliza el diagrama Jack Knife, herramienta que permite representar cada modo de falla en función de:

- El número de fallas ocurridas.
- El tiempo medio de reparación MTTR de esas fallas.
- Las horas anuales de detención asociadas a cada modo de falla, calculadas como:

$$H=N \times MTTR$$

De este modo, el diagrama Jack Knife permite visualizar qué modo de falla aporta más horas de indisponibilidad al equipo y constituye la base para jerarquizar las fallas antes de definir qué modo(s) de falla serán intervenidos mediante la metodología RCM 2.

Datos cuantitativos por modo de falla

A partir del FMECA desarrollado en el capítulo 1 se seleccionaron los modos de falla de los sistemas hidráulico, combustible, admisión de aire, lubricación y giro.

Para cada modo de falla se definieron los siguientes parámetros:

- Número de fallas por año (N): cantidad de eventos registrados o estimados en un año de operación.
- Tiempo de falla(h/año): horas totales de detención asociadas al modo de falla en el periodo.
- MTTR (h): Tiempo medio de reparación, obtenido como la razón entre el tiempo de falla acumulado y el número de eventos:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo de falla (h/año)}}{\text{Nº de fallas/año}}$$

Estos datos se construyeron a partir de los registros de la pala Komatsu PC 5500

Datos cuantitativos por modo de falla para el diagrama Jack Knife

Código	Sistema	Modo de falla (resumen)	Nº fallas/año (N)	Tiempo de falla (h/año)	MTTR (h)
MF1.1	Hidráulico	Obstrucción parcial de filtros hidráulicos	45	360	8
MF1.2	Hidráulico	Saturación de respiraderos o desecantes	42	320	7,6
MF1.3	Hidráulico	Restricción en filtro de succión / cavitación	38	320	8,4
MF1.4	Combustible	Filtro primario/secundario saturado	55	358	6,5
MF1.5	Admisión de aire	Filtro de aire saturado	32	176	5,5
MF2.1	Lubricación/Motor	Filtro de aceite colapsado (bypass)	40	280	7
MF2.2	Lubricación centralizada	Obstrucción en líneas/boquillas	57	399	7
MF2.3	Giro	Contaminación/obstrucción en filtros/respiraderos	33	248	7,5
—	—	Totales	342	2461	—
—	—	Limite	42,75		7,2

Tabla 4: Datos de modos de falla para la construcción del diagrama Jack Knife

Construcción del diagrama Jack Knife

A partir de los datos presentados en la tabla 4 se construyó el diagrama Jack Knife cuyo propósito es presentar cada modo de falla en función de 2 variables fundamentales:

- Número de fallas por año, ubicación en el eje X.
- Tiempo medio de reparación (MTTR), ubicado en el eje Y.

Cada punto del diagrama corresponde a un modo de falla específico (MF 1.1, MF 1.2, ..., MF2.3) y refleja simultáneamente cuántas veces ocurre la falla y cuánto demora su reparación.

Además del eje X e Y, el gráfico incluye 2 líneas de referencia:

- Una línea vertical azul, correspondiente al valor promedio del número total de fallas.
- Una línea horizontal roja, correspondiente al promedio del MTTR del conjunto de fallas evaluadas.

Ambas líneas dividen el plano en cuatro cuadrantes que permiten clasificar las fallas en combinación de más o menos fallas que el promedio, y mayor o menor tiempo de reparación.

Para complementar el análisis se incorporaron además líneas de indisponibilidad, las cuales representan distintos niveles de impacto operativo según la siguiente relación:

$$H=N \times MTTR$$

Se utilizaron cuatro valores de referencia de indisponibilidad anual (100, 200,300 y 400 horas).

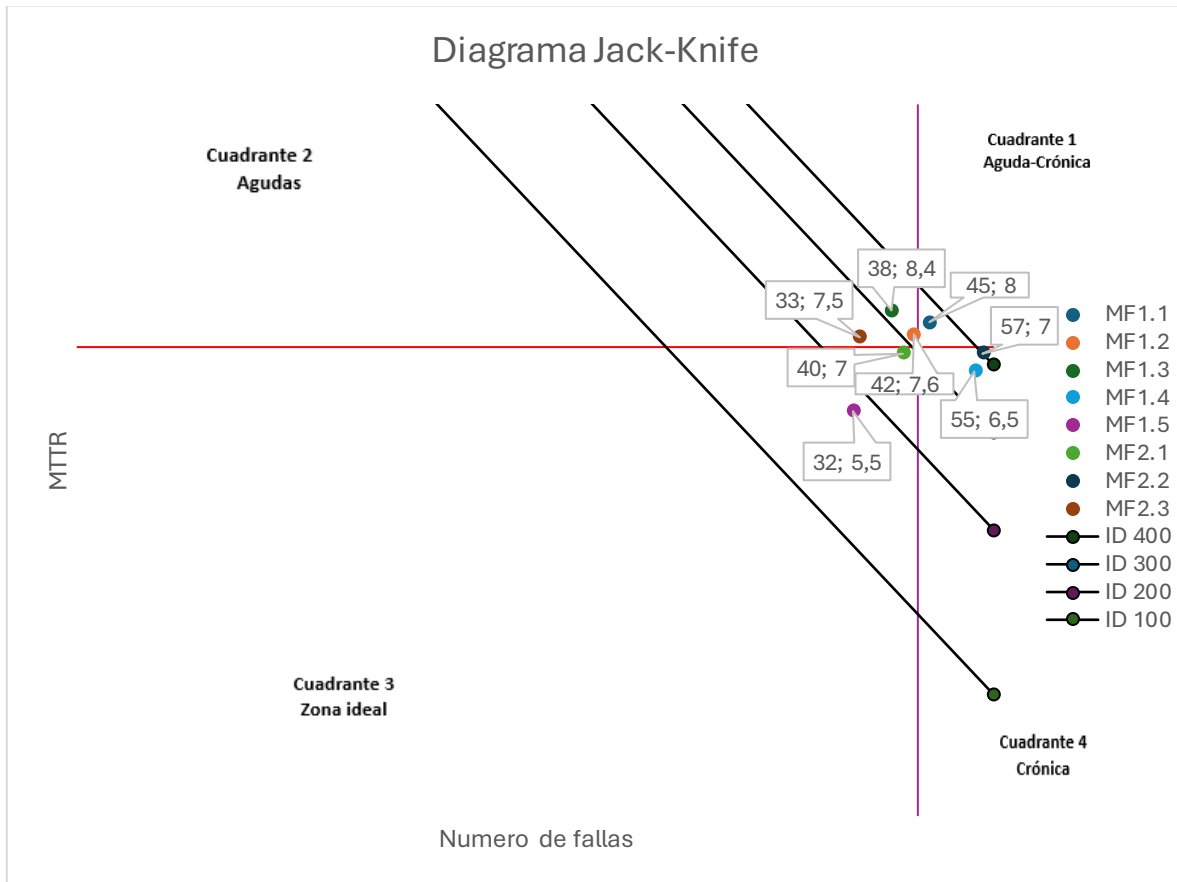


Figura 3: Diagrama Jack Knife

El diagrama Jack Knife obtenido permite visualizar de forma clara la posición relativa de cada punto de falla, identificando que fallas ocurren con mayor frecuencia, cuales presentan mayores tiempos de reparación y cuáles generan mayores indisponibilidades anuales.

Este resultado constituye la base para la siguiente etapa del análisis, donde se interpreta la ubicación de cada modo de falla dentro del diagrama y posteriormente se procede a jerarquizar las fallas del equipo, tal como lo exige el objetivo específico del estudio.

En la sección siguiente se realizará la interpretación detallada de los cuadrantes y se inicia la jerarquización formal de los modos de falla. (Komatsu Chile S.A., 2024)

Interpretación del diagrama Jack Knife

El diagrama Jack knife permite clasificar cada modo de falla según 2 criterios fundamentales:

- Número de fallas por año (eje X).
- MTTR (h) tiempo medio de reparación (eje Y).

La combinación de ambos permite distinguir fallas frecuentes, severas, repetitivas, o bien poco frecuentes, pero de reparación crítica. Las líneas de indisponibilidad agregadas (100, 200, 300, y 400 h) permiten cuantificar el impacto de cada modo de falla sobre la disponibilidad total del equipo.

A continuación, se presentan la interpretación detallada en función de los cuadrantes del gráfico.

Interpretación por cuadrantes

El diagrama se divide en cuatro zonas definidas por las líneas promedio:

- Línea vertical azul: Promedio de número de fallas
- Línea horizontal roja: promedio de MTTR

Los cuadrantes quedan definidos así:

Cuadrante	Clasificación	Condición cuantitativa	Interpretación operacional
I (arriba-derecha)	Fallas Agudas y Crónicas	Alta cantidad de fallas + Alto MTTR	Peor combinación posible. Fallas frecuentes y largas de reparar. Máxima contribución a la indisponibilidad del equipo.
II (arriba-izquierda)	Fallas Agudas	Baja cantidad de fallas + Alto MTTR	Fallas severas, de reparación extensa. Aunque ocurren poco, cada evento genera un alto impacto operacional.
III (abajo-izquierda)	Zona Ideal / Fallas Controladas	Baja cantidad de fallas + Bajo MTTR	Fallas ocasionales, fáciles de gestionar y con mínima contribución a la indisponibilidad anual. Representa el comportamiento esperado o deseado.
IV (abajo-derecha)	Fallas Crónicas	Alta cantidad de fallas + Bajo MTTR	Fallas recurrentes. Aunque cada intervención es breve, su efecto acumulado genera pérdida significativa de disponibilidad.

Tabla 5: Descripción de cuadrantes del Diagrama Jack Knife

Análisis por modo de falla según cuadrante del diagrama Jack Knife

A continuación, se presenta el análisis detallado de cada modo de falla (MF), considerando:

- Número de fallas anuales (N).
- Tiempo medio de reparación (MTTR).
- Indisponibilidad anual $H=N \times MTTR$.
- Ubicación en el cuadrante correspondiente.
- Impacto en la confiabilidad y mantenibilidad del equipo.
- Interpretación operativa.

Cuadrante 1: Fallas Agudas y Crónicas (alta recurrencia + alto MTTR)

(zona Superior derecha del Jack Knife, máxima criticidad)

MF1.1: Obstrucción parcial del filtro hidráulicos

Ubicación: cuadrante 1 (Aguda-Crónica)

Datos:

- N= 45 fallas/año
- MTTR= 8 h
- H= 360 h/año

Interpretación técnica:

Es la falla más crítica del equipo, combina elevada recurrencia con tiempos prolongados de reparación.

Esto refleja:

- Baja confiabilidad del sistema hidráulico (fallas repetitivas).
- Mantenibilidad deficiente, pues las intervenciones requieren tiempo elevado.
- Contribuye fuertemente a la indisponibilidad global.

Cuadrante 2: fallas agudas (baja frecuencia + alto MTTR)

(Zona superior izquierda fallas severas por alta dificultad de reparación)

MF1.2: Saturación de respiraderos/desecantes (hidráulico)

Ubicación: Cuadrante 2

Datos:

- 42 fallas/año
- MTTR= 7,6 h
- H=320 h/año

Interpretación técnica:

Pese a no ser extremadamente recurrente, las intervenciones son complejas y prolongadas.

Afecta:

- Confiabilidad hidráulica (contaminación interna, pérdida de presión)
- Mantenibilidad, ya que requiere de montaje y limpieza profunda.

MF1.3: Restricción en filtro de succión/cavitación

Ubicación: cuadrante 2

Datos:

- N= 38 fallas/año
- MTTR =8,4
- H=320 h/año

Interpretación técnica:

Falla severa con riesgo de:

- Cavitación
- Sobre calentamiento

Su menor frecuencia no reduce su criticidad técnica dado que el MTTR es de los más altos del equipo.

MF2.3: Contaminación/obstrucción en filtros o respiraderos del giro

Ubicación: cuadrante 2

Datos:

- N= 33 fallas/año
- MTTR = 7,5 h
- H = 248 h/año

Interpretación técnica:

Falla de acceso complejo, elevada dificultad de reparación y alto riesgo operacional (fallas de giro o detención completa).

Indica:

- Confiabilidad baja del sistema de giro.
- Mantenibilidad limitada por accesos y condiciones de operación.

Cuadrante 3: Zona ideal (baja frecuencia+ bajo MTTR)

(Fallas de bajo impacto, fáciles de controlar)

MF1.5: Filtro de aire saturado (admisión de aire)

Ubicación: cuadrante 3

Datos:

- N=32 fallas/año
- MTTR=5,5 h
- H= 176 h/año

Interpretación:

- Falla de bajo impacto y fácil de controlar mediante mantenimiento preventivo.
- Confiabilidad y mantenibilidad adecuadas.

MF2.1: Filtro de aceite colapsado (motor/lubricación)

Ubicación: cuadrante 3

Datos:

- $N = 40$ fallas/año
- $MTTR = 7$ h
- $H = 280$ h/años

Interpretación:

- Aporta hora de detención, pero con menos impacto relativo respecto a fallas hidráulicas.
- Las tareas de mantenimiento son accesibles y predecibles

Cuadrante 4: Fallas Crónicas (Alta frecuencia+ bajo MTTR)

(fallas repetitivas cuyo impacto se acumula en el tiempo)

MF1.4: Filtro de combustible saturado

Ubicación: cuadrante 4

Datos:

- N= 55 fallas/año
- MTTR= 6,5 h
- H= 358 h/año

Interpretación técnica:

Muy recurrente, típicamente por contaminación presencia de agua o mala calidad del combustible.

Impacto en confiabilidad:

- Aumenta probabilidad de derate del motor.
- Afecta continuidad productiva por interrupciones frecuentes.

Aunque el MTTR no es extremo, su recurrencia genera impacto acumulado significativo.

MF2.2: Obstrucción en líneas/boquillas (lubricación centralizada)

Ubicación: cuadrante 4

Datos:

- N= 57 fallas/año
- MTTR= 7 h
- H= 399 h/año

Interpretación técnica:

Es la falla crónica más severa del equipo.

Genera:

- Lubricación deficiente
- Daño acelerado de pasadores, bujes y componentes de giro
- Fallas estructurales potencialmente costosas

Su mantenibilidad es moderada, pero su recurrencia indica un problema sistemático de confiabilidad.

Resumen interpretativo general de Jack Knife

- MF1.1 Se confirma como el modo de falla más crítico, por combinar alta recurrencia + alto MTTR.
- MF2.2 y MF1.4 presentan criticidad crónica por su alta recurrencia, constituyendo la segunda prioridad operativa.
- MF1.2, MF1.3 y MF2.3 Son fallas agudas, de alta severidad técnica.
- MF1.5 y MF2.1 corresponden a fallas de bajo impacto, con buena mantenibilidad.

Jerarquización de modos de falla del equipo

La jerarquización de los modos de falla del equipo se realizó directamente a partir del diagrama Jack Knife, el cual representa en el eje X el número de fallas por año y en el eje Y el tiempo medio de reparación (MTTR) de cada modo de falla. La combinación de ambos permite visualizar que falla presentan el mayor impacto operativo sobre la disponibilidad de la pala Komatsu PC 5500.

El gráfico se divide en cuatro cuadrantes definidos por las líneas de promedio, lo que permite clasificar el comportamiento de los modos de falla en:

Cuadrante	Clasificación	Condición cuantitativa
I (arriba-derecha)	Fallas Agudas y Crónicas	Alta cantidad de fallas + Alto MTTR
II (arriba-izquierda)	Fallas Agudas	Baja cantidad de fallas + Alto MTTR
III (abajo-izquierda)	Zona Ideal / Fallas Controladas	Baja cantidad de fallas + Bajo MTTR
IV (abajo-derecha)	Fallas Crónicas	Alta cantidad de fallas + Bajo MTTR

Gráfico simple Jack Knife (ayuda visual)

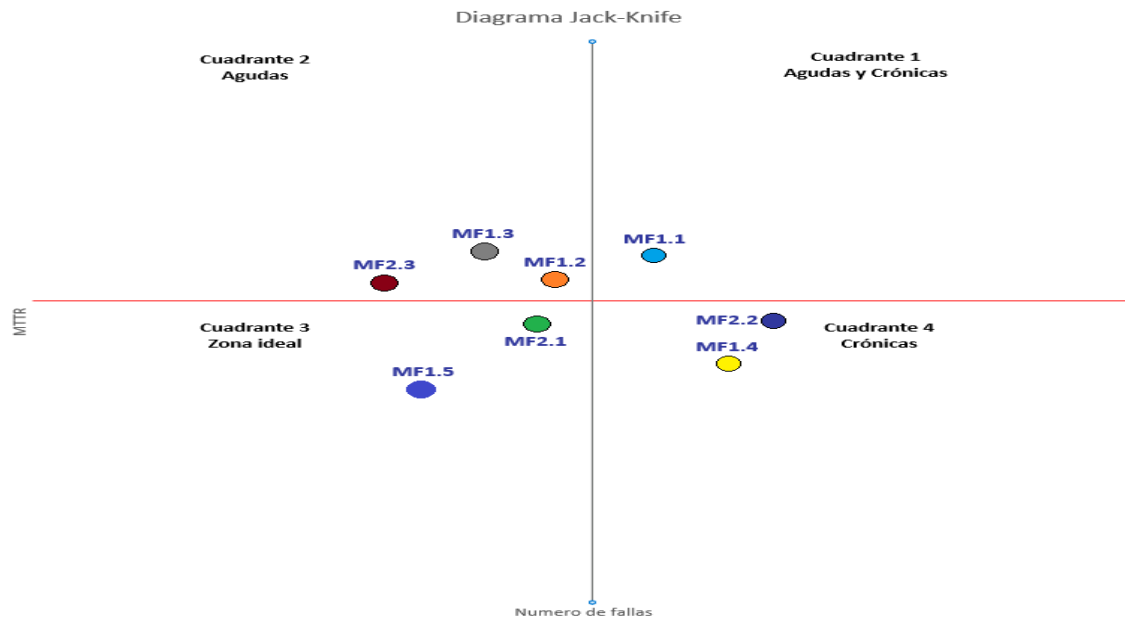


Figura 4: Grafico simple Del Diagrama Jack Knife

Jerarquización de modo de falla según diagrama Jack Knife

Código	Modo de Falla (resumen)	Cuadrante
MF1.1	Obstrucción parcial de filtros hidráulicos	I – Aguda–Crónica (más crítica)
MF1.2	Saturación de respiraderos/desecantes (hidráulico)	II – Aguda
MF1.3	Restricción en succión / cavitación	II – Aguda
MF2.3	Contaminación/obstrucción en sistema de giro	II – Aguda
MF2.2	Obstrucción en líneas/boquillas – Lubricación centralizada	IV – Crónica
MF1.4	Filtro de combustible saturado	IV – Crónica
MF2.1	Filtro de aceite colapsado (motor/lubricación)	III – Zona ideal / bajo impacto
MF1.5	Filtro de aire saturado (admisión)	III – Zona ideal / bajo impacto

Tabla 6: Jerarquización de los modos de falla

La tabla permite visualizar claramente que el modo de falla MF1.1 presenta la combinación más desfavorable entre recurrencia, severidad y aporta a la indisponibilidad anual, ubicándose en el cuadrante crítico del diagrama Jack Knife.

Justificación metodología

La jerarquización se realizó exclusivamente a partir del diagrama Jack Knife debido a que el objetivo del trabajo así lo establece y porque esta herramienta permite comparar modo de falla mediante variables objetivas (número de fallas, MTTR e indisponibilidad), favoreciendo una priorización cuantitativa más precisa que métodos cualitativos como RPN o matrices de riesgo.

Selección del modo de falla para intervenir

De acuerdo con el objetivo específico del trabajo:

“Identificar y jerarquizar los modos de falla del equipo utilizando el diagrama Jack Knife, con el propósito de determinar aquellos con mayor impacto sobre la disponibilidad operacional.”

La selección para continuar el análisis debe realizarse a nivel de modo de falla, utilizando directamente los resultados del diagrama Jack Knife.

El objetivo del Jack Knife es identificar la falla más crítica del equipo, es decir, aquella que:

- Presenta el mayor número de fallas.
- Posee un tiempo medio de reparación elevado (MTTR).
- Y, en consecuencia, aporta más hora de indisponibilidad anual. ($H=N \times MTTR$).

Modo de falla seleccionado

El diagrama Jack Knife posicionó al siguiente modo de falla en el cuadrante 1, correspondiente a fallas de Aguda y Crónica:

MF1.1: Obstrucción parcial de filtro hidráulicos. (sistema hidráulico)

Razones de selección:

- Es el modo de falla con mayor criticidad técnica del gráfico.
- Presenta 45 fallas anuales (una de las recurrencias más altas).
- Su MTTR es elevado (8 h)
- la indisponibilidad anual asociada alcanza 360 horas, siendo una de las más altas del equipo.
- Se ubica en el cuadrante más crítico del Jack Knife cuadrante 1, donde se concentran las fallas de mayor impacto operacional.

Por estas razones, MF1.1 es el modo de falla prioritario para desarrollar el análisis RCM2 en el capítulo 3.

Justificación del enfoque

De acuerdo con los resultados del diagrama Jack Knife, la continuación del análisis debe centrarse exclusivamente en el modo de falla más crítico, sin incluir los demás modos asociados al sistema. El propósito del Jack Knife es identificar de forma cuantitativa la falla que presenta el mayor impacto sobre la disponibilidad del equipo, y en este caso corresponde al modo de falla:

MF1.1: Obstrucción parcial de filtros hidráulicos.

Este modo de falla se ubica en el cuadrante 1 del diagrama, caracterizado por fallas con alta recurrencia y tiempo de reparación elevados. Además, representa uno de los mayores valores de indisponibilidad anual, Por lo que constituye el principal problema de confiabilidad del equipo.

En consecuencia, resulta adecuado continuar el análisis de confiabilidad a partir de este modo de falla, ya que:

- Representa el mayor impacto de la continuidad operativa.
- Su frecuencia y severidad lo convierten en el punto de mayor criticidad.
- Permite focalizar el estudio en la causa más relevante antes de aplicar RCM 2.

Con la identificación y la selección del modo de falla crítico MF1.1: Obstrucción parcial del filtro hidráulico, el presente capítulo cumple con el objetivo de jerarquizar las fallas del equipo mediante el diagrama Jack Knife.

Este modo de falla se establece como el punto central para el desarrollo posterior del análisis de mantenimiento. En el siguiente capítulo se aplicará la metodología RCM 2 especialmente sobre este modo de falla, con el fin de definir las tareas de mantenimiento más adecuadas para reducir su ocurrencia y mejorar la disponibilidad de la pala Komatsu PC 5500.

Capítulo 3

Aplicación de la metodología RCM 2 sobre el modo de falla priorizado

En el capítulo anterior se realizó la jerarquización de los modos de falla del equipo mediante el diagrama Jack Knife, utilizando como variables el número de falla y el tiempo medio de reparación (MTTR). A partir de este análisis se identificó el modo de falla con mayor criticidad, considerando su impacto combinado en términos de recurrencia, severidad e indisponibilidad anual del equipo.

Para el desarrollo del análisis del modo de falla priorizado, se seleccionó la metodología RCM2 (Reliability Centered Maintenance), debido a su enfoque estructurado y sistemático orientado a la confiabilidad funcional del equipo y al análisis explícito de las consecuencias de falla. A diferencia de otras metodologías de gestión de mantenimiento, como el TPM, que se enfoca principalmente en la participación operativa y la mejora continua de la eficiencia global del equipo, RCM2 permite evaluar de forma detallada qué funciones deben preservarse, cómo pueden fallar y qué tareas de mantenimiento son técnica y económicamente justificables para cada modo de fallo específico.

La aplicación de RCM2 en este estudio no implica descartar otras metodologías de mantenimiento, sino que responde a la necesidad de contar con una herramienta analítica que permita definir tareas basadas en condición, reacondicionamiento cíclico, sustitución programada o incluso la aceptación del riesgo, según la criticidad del modo de falla y la posibilidad real de detección anticipada. En este contexto, RCM2 resulta especialmente adecuada para el análisis de modos de falla críticos en equipos de alto impacto operacional, como la pala hidráulica Komatsu PC 5500.

En consecuencia, el presente capítulo desarrolla la aplicación de la metodología RCM2 sobre el modo de falla priorizado, con el propósito de definir la estrategia de mantenimiento

más adecuada en función de sus consecuencias operacionales y de la facilidad técnica y económica de las tareas de mitigación. Para ello, se emplea el árbol de decisión RCM2, estructurando el análisis desde la función y falla funcional asociadas, hasta la selección de tareas de mantenimiento correspondientes, (mantenimiento basado en condición, reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica u otras alternativas), de acuerdo con los criterios establecidos por la metodología. (Moubray, J., 1997)

Modo de falla seleccionado para aplicar RCM2

De acuerdo con el resultado del diagrama Jack Knife del capítulo anterior, El modo de falla seleccionado como prioritario para el desarrollo del RCM2 es:

MF1.1: Obstrucción parcial de filtros hidráulicos (sistema hidráulico)

Este modo de falla fue seleccionado por ubicarse en la zona de mayor criticidad del diagrama, representando un impacto relevante sobre la disponibilidad del equipo y sobre la continuidad del ciclo de carguío.

Objetivos de este capítulo

El objetivo de este capítulo es definir y justificar las tareas de mantenimiento más convenientes para el modo de falla MF1.1, aplicando la lógica RCM2 mediante:

- Identificación y confirmación de la función y falla funcional asociada al MF seleccionado
- Análisis de consecuencias (H-S-E-O) y evaluación de evidencia.
- Aplicación del árbol de decisiones RCM2
- Selección de tareas y frecuencias recomendadas, según criterio técnico y operacionales

Selección del modo de falla a analizar

En base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior donde se realizó la jerarquización de las fallas del equipo mediante el diagrama Jack Knife, se selecciona el modo de falla MF1.1: Obstrucción parcial de filtros hidráulicos como el caso de estudio para la aplicación de la metodología RCM2.

La selección se fundamenta en que dicho modo de falla se ubica en el cuadrante 1 (zona aguda y crónica) del diagrama Jack Knife, Lo que indica una combinación simultánea de:

- Alta recurrencia, con un número elevado de fallas anuales.
- Alta severidad, reflejada en un tiempo medio de reparación (MTTR) elevado.
- Alta contribución a la indisponibilidad anual del equipo, siendo una de las principales fuentes de detención operacional.

Este modo de falla presenta el mayor impacto global sobre la confiabilidad y la disponibilidad del sistema hidráulico, afectando directamente la capacidad de carguío de la pala hidráulica Komatsu PC 5500 y, por ende, la continuidad del proceso productivo.

En consecuencia, el modo de falla MF1.1 constituye el caso más representativo y crítico para aplicar la lógica RCM2, permitiendo desarrollar tareas de mantenimiento técnicamente justificadas y económicamente viables, orientadas a reducir la frecuencia de ocurrencia y el tiempo de reparación asociado a este tipo de eventos.

Análisis de consecuencias del modo de falla MF1.1

Una vez seleccionado el modo de falla MF1.1: Obstrucción parcial de filtros hidráulicos, se procede a evaluar sus consecuencias, siguiendo la lógica establecida por la metodología RCM2.

El análisis de consecuencias tiene como objetivo determinar el impacto real del modo de falla, permitiendo clasificarlos según sus efectos sobre:

- La operación del equipo
- La seguridad de las personas
- El medio ambiente
- La continuidad del proceso productivo

Este análisis se realiza previo a la aplicación del árbol de decisiones, ya que la clasificación de consecuencia define el camino que seguirá el modo de fallo dentro del proceso RCM2.

Descripción del modo de falla MF1.1

El modo de falla MF1.1 corresponde a la obstrucción parcial de los filtros hidráulicos, lo que provoca una restricción progresiva del flujo de aceite dentro del sistema hidráulico.

Esta condición se manifiesta a través de:

- Caídas de presión hidráulica
- Pérdida de caudal en actuadores
- Movimientos lentos o erráticos de la pala
- Aumento de la temperatura del aceite hidráulico

En condiciones normales de operación, esta falla puede no generar una detención inmediata, pero degrada progresivamente el desempeño del equipo hasta provocar una parada operacional.

Evaluación de consecuencias según RCM2

De acuerdo con la metodología RCM2, se evalúan las siguientes preguntas fundamentales para el modo de falla MF1.1:

H: Consecuencia operacional

¿Es evidente para los operadores la pérdida de función causada por el modo de falla en condiciones normales?

Respuesta: Si

La obstrucción del filtro hidráulicos genera síntomas observables, tales como disminución del rendimiento del sistema hidráulico, alarma de presión y pérdida de velocidad en los movimientos del equipo.

S: Consecuencia de seguridad

¿Produce este modo de falla una pérdida de función que puede ocasionar lesiones graves o fatales?

Respuesta: No

Si bien la falla afecta el desempeño del equipo, no se identifica un riesgo directo e inmediato para la integridad física de las personas, siempre que se apliquen los procedimientos operacionales y de seguridad establecidos.

E: Consecuencia ambiental

¿Produce este modo de falla una pérdida de función que infrinja normativas ambientales?

Respuesta: NO

La obstrucción parcial de filtros hidráulicos no genera, por sí sola, derrames o emisiones contaminantes que constituyan un impacto ambiental directo.

O: Consecuencia operacional

¿El modo de falla afecta directamente la capacidad operacional del equipo?

Respuesta: SI

La restricción del flujo hidráulico reduce la eficiencia del ciclo de carguío, Incrementa los tiempos de operación y puede derivar en una detención no planificada del equipo.

Clasificación final de consecuencias

Con base en la evaluación anterior, el modo de falla MF1.1 cuál se clasifica como una falla operacional, con impacto directo sobre la disponibilidad y confiabilidad del equipo, pero sin consecuencias críticas para la seguridad y el medio ambiente.

Esta clasificación permite continuar con la aplicación del árbol de decisiones y RCM2, orientado a definir las tareas de mantenimiento más adecuadas para controlar este modo de falla.

Aplicación del árbol de decisiones RCM2

Una vez evaluadas las consecuencias del modo de falla seleccionado (MF1.1: Obstrucción parcial de filtros hidráulicos), se procede a la aplicación del árbol de decisión de la metodología RCM2, con el objetivo de definir el tipo de tarea de mantenimiento más adecuada para controlar o mitigar este modo de falla.

El árbol de decisión RCM2 permite establecer, de manera lógica y estructurada, si un modo de falla debe ser abordado mediante tareas de mantenimiento basadas en condición, tareas de reacondicionamiento cíclico, tareas de sustitución cíclica, tareas de búsqueda de fallas o, en su defecto, aceptar el riesgo operativo.

Este análisis se realiza considerando las respuestas a una secuencia de preguntas relacionadas con:

- Evidencia de la falla durante la operación
- Consecuencias en seguridad y medio ambiente
- Impacto en la operación
- Factibilidad técnica y económica de las tareas de mantenimiento

La figura que se muestra a continuación es el árbol de decisiones RCM2 utilizado como base para el análisis del modo de falla MF1.1. (SAE, 2011)

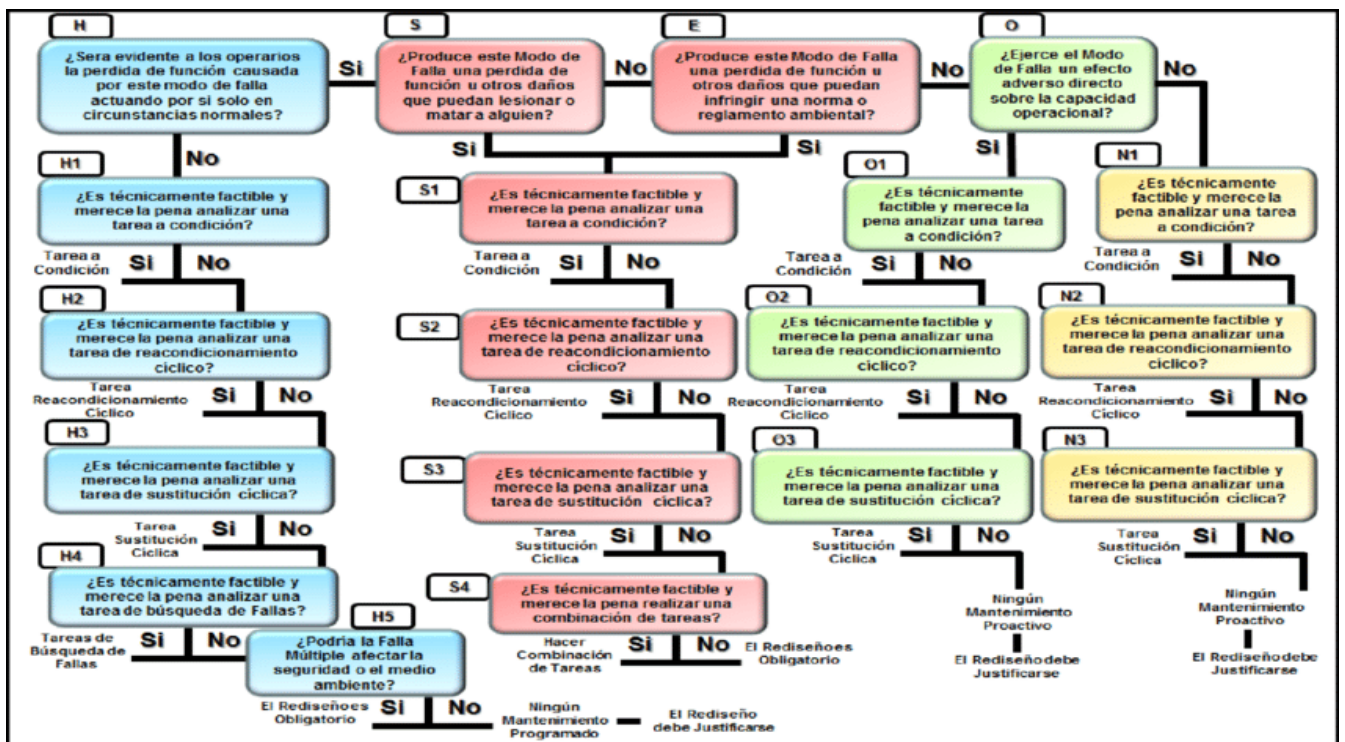


Figura 5: Árbol de decisiones

A continuación, se presenta la tabla de evaluación, en el cual se registra la ruta seguida dentro del árbol de decisiones (H, S, E y O), junto con la alternativa seleccionada (O1, O2 u O3), permitiendo justificar de manera trazable la tarea de mantenimiento propuesta para el modo de falla analizado.

Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3
				S1	S2	S3
				O1	O2	O3
H	S	E	O	N1	N2	N3
SI	NO	NO	SI	SI		

Tabla 7: Evaluación de las consecuencias

Interpretación del resultado del árbol de decisiones

De acuerdo con la ruta seguida en el árbol de decisiones RCM2, el modo de falla MF1.1 presenta consecuencias operacionales relevantes, sin implicancias directas en seguridad ni medio ambiente.

La evaluación técnica indica que es factible y conveniente aplicar una tarea condición (O1), ya que el modo de falla puede ser detectado mediante indicadores de restricción, monitoreo de presión diferencial e inspecciones periódicas, permitiendo intervenir antes de que se produzca una pérdida significativa de disponibilidad del equipo.

En consecuencia, se descartan las alternativas de reacondicionamiento cíclico (O2) y sustitución cíclica (O3), dado que no resultan óptimas frente a la capacidad de detección temprana y al menor impacto económico de la estrategia seleccionada.

Este resultado sirve como base para la definición detallada de la tarea de mantenimiento su frecuencia y los recursos asociados, los cuales serán desarrollados en la sección siguiente.

Definición de la tarea de mantenimiento para el modo de falla MF1.1

En base a la aplicación del árbol de decisión RCM2, determina en que la estrategia más adecuada para el control del modo de falla MF1.1 corresponde a una tarea de mantenimiento basada en condición.

Este tipo de tarea permite detectar la degradación del elemento filtrante antes de que se produzca la falla funcional, reduciendo la probabilidad de detención no planificadas y mejorando la confiabilidad del sistema hidráulico.

A continuación, se definen las características de la tarea seleccionada, incluyendo su descripción, método de ejecución y frecuencia recomendada.

Ítem	Descripción
Modo de falla	MF1.1 – Obstrucción parcial de filtros hidráulicos
Tipo de tarea	Mantenimiento basado en condición
Descripción de la tarea	Monitoreo de restricción (ΔP), revisión de alarmas y condición del filtro
Método de ejecución	Lectura de indicadores, inspección visual y/o análisis de aceite
Condición de intervención	ΔP fuera de rango / alarma de restricción / evidencia de contaminación
Acción correctiva	Reemplazo del elemento filtrante
Sistema afectado	Sistema hidráulico

Tabla 8: Definición de la tarea de mantenimiento para MF1.1

Definición de la frecuencia

La frecuencia de la tarea se establece en cada 250 horas de operación, en concordancia con los intervalos de mantenimiento preventivo utilizados para la pala Komatsu PC 5500 y con la criticidad del modo de falla.

Adicionalmente, la tarea se activa por condición cuando se detecta valores de presión diferencial fuera de los rangos normales o alarmas de restricción, permitiendo una intervención anticipada.

Validación técnica

Desde el punto de vista técnico, la tarea basada en condición resulta adecuada debido a que la obstrucción parcial del filtro hidráulico presenta síntomas detectables antes de la falla funcional, tales como incrementos de presión diferencial, alarmas de restricción y degradación del fluido hidráulico.

La detección temprana permite intervenir el sistema antes de que se produzca una pérdida significativa de presión o caudal, reduciendo el riesgo de detenciones no programadas y daños secundarios en bombas y válvulas.

Por lo tanto, la tarea seleccionada cumple con el principio fundamental del RCM2 de actuar antes de la pérdida de función, mejorando la confiabilidad del sistema hidráulico.

Validación económica

Desde el punto de vista económico, la tarea propuesta implica un costo reducido asociado principalmente a inspecciones periódicas y reemplazos planificados del elemento filtrante.

En contraste, la ocurrencia de una falla no planificada en el sistema hidráulico genera tiempos de detención prolongados, pérdida de producción y mayores costos de reparación.

Adicionalmente, considerando un valor de referencia de 50000 USD por hora de detención, asociado a la pérdida de ciclos de carguío CAEX, la indisponibilidad anual de 360 horas registrada para el modo de falla MF1.1 representa un impacto económico del orden de 18 a 36 millones USD anuales.

Considerando que el modo de falla MF1.1 presenta una alta contribución a la indisponibilidad anual del equipo, la aplicación de una tarea preventiva basada en condición resulta económicamente justificable, al permitir controlar un modo de falla crítico con un costo significativamente menor que el de una detención no planificada.

En consecuencia, la tarea de mantenimiento basado en condición definida para el modo de falla MF1.1 cumple con los criterios técnicos y económicos establecidos por la metodología RCM2 para el modo de falla seleccionado, dando paso en las siguientes sesiones al desarrollo del plan de mantenimiento y su análisis comparativo.

Desarrollo del plan de mantenimiento propuesto para el modo de falla MF1.1

A partir de la aplicación del análisis RCM2 al modo de falla MF1.1, se define un plan de mantenimiento específico orientado a controlar la obstrucción parcial de filtros hidráulicos mediante tareas basadas en condición.

El plan propuesto busca reducir la ocurrencia de detenciones no planificadas, disminuir la indisponibilidad asociada al sistema hidráulico y mejorar la confiabilidad operacional del equipo, manteniendo un equilibrio técnico económico acorde a los objetivos del trabajo.

Descripción general del plan propuesto

El plan de mantenimiento, propuestos se enfoca en la detección temprana del deterioro del elemento filtrante, reemplazando el enfoque reactivo por una estrategia preventiva basada en condición.

La intervención se realiza antes de que la obstrucción del filtro provoque pérdidas significativas de presión hidráulica o fallas funcionales que afecten al ciclo de carguío del equipo.

Elemento	Descripción
Modo de falla	MF1.1 – Obstrucción parcial de filtros hidráulicos
Sistema	Hidráulico
Tipo de tarea	Mantenimiento basado en condición
Actividad principal	Monitoreo de presión diferencial y estado del filtro
Método de detección	Lectura de ΔP (presión diferencial), alarmas de restricción, inspección visual y análisis de aceite
Frecuencia	Cada 250 h y por condición (alarma ΔP / evidencia en aceite)
Acción correctiva	Limpieza o reemplazo del filtro antes de falla funcional
Objetivo de la tarea	Evitar pérdida de presión y detenciones no planificadas

Tabla 9: Plan de mantenimiento propuesto

Justificación del plan propuesto

La implementación de este plan permite intervenir el sistema hidráulico en una etapa temprana del deterioro del filtro, evitando que la restricción alcance niveles críticos.

Al actuar antes de la falla funcional, se reduce la probabilidad de detenciones no programadas y se protege la integridad de componentes de alto costo como bombas hidráulicas y válvulas de control.

Este enfoque se encuentra alineado con los principios del RCM2, priorizando tareas técnicamente factibles y económicamente justificables para modos de falla críticos.

Con la definición del plan de mantenimiento propuesto para el modo de falla MF1.1, se establece unas bases sólidas para evaluar su impacto sobre la confiabilidad, la mantenibilidad y los costos operacionales del equipo, lo cual será abordado en la siguiente sección mediante una comparación conceptual entre la situación actual y la propuesta.

Comparación conceptual entre la situación actual y el plan de mantenimiento propuesto

Con el fin de evaluar el impacto del plan de mantenimiento robusto para el modo de falla MF1.1, se realiza una comparación conceptual entre la situación actual del mantenimiento y la estrategia definida mediante la metodología RCM2.

Esta comparación permite identificar los principales cambios en el enfoque de intervención, así como sus efectos los esperados sobre la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad del equipo, sin introducir aún estimaciones económicas detalladas.

Situación actual del mantenimiento (antes de RCM2)

En la situación actual, la gestión del modo de falla MF1.1 se basa principalmente en mantenimientos programados por intervalo fijo y en intervenciones correctivas una vez que se manifiesta la falla funcional.

La obstrucción de los filtros hidráulicos suele detectarse cuando la restricción ya ha generado pérdidas de presión significativas, activación de alarmas operacionales o disminución del rendimiento del equipo, lo que conlleva detenciones no planificadas y tiempos de reparación elevados.

Situación con el plan de mantenimiento propuesto (RCM2)

Con la aplicación del plan de mantenimiento basado en condición definido mediante RCM2, el control del modo de falla MF1.1 se traslada a una etapa temprana del deterioro del filtro hidráulico.

La detención anticipada mediante indicadores operacionales y monitoreo del estado del sistema permite programar la intervención antes de que se produzca la falla funcional, reduciendo la severidad del evento y evitando detenciones no planificadas.

Tabla de comparación entre situación actual y plan propuesto

Aspecto	Situación actual	Plan propuesto (RCM2)
Enfoque de mantenimiento	Reactivo / por intervalo fijo	Basado en condición
Momento de intervención	Post-falla o restricción severa	Previo a falla funcional
Tipo de detención	No planificada	Planificada
Impacto en disponibilidad	Alto	Reducido
Control del deterioro	Limitado	Sistemático
Protección de componentes	Parcial	Mejorada

Tabla 10: Comparación de estado actual y plan propuesto

Interpretación técnica

la comparación evidencia que el plan de mantenimiento propuesto permite un mayor control sobre el deterioro del filtro hidráulico, disminuyendo la probabilidad de eventos críticos y mejorando la capacidad de planificación de las intervenciones.

Este cambio de enfoque contribuye directamente a mejorar la confiabilidad del sistema hidráulico y a reducir la variabilidad del tiempo de reparación, sentando las bases para una optimización posterior de los costos asociados al mantenimiento.

A partir de esta comparación conceptual, resulta pertinente evaluar el impacto técnico y económico del plan propuesto, lo cual será abordado en la siguiente sección mediante un análisis de beneficios esperados y su contribución a la reducción de indisponibilidad del equipo.

Definición de la tarea de mantenimiento

De acuerdo con la aplicación del árbol de decisión RCM2 al modo de falla MF1.1 (obstrucción parcial de filtros hidráulicos), se determina que la estrategia más adecuada corresponde a una tarea de mantenimiento basado en condición.

Esta decisión se fundamenta en que la falla:

- Es evidente durante la operación.
- Tiene impacto directo en la disponibilidad operacional.
- Es detectable antes de que ocurra la falla funcional mediante indicadores técnicos.
- Presenta una relación costo beneficio favorable frente a una detención no planificada.

Descripción técnica de la tarea

La tarea de mantenimiento basado en condición para el modo de falla MF1.1 consiste en el monitoreo periódico del estado de los filtros hidráulicos mediante:

- Revisión de presión diferencial en filtros.
- Monitoreo de alarmas de restricción del sistema.
- Análisis de aceite orientado a contaminación y partículas.

Es cuando los indicadores superan los valores de referencia establecidos por el fabricante, se procede al reemplazo preventivo del elemento filtrante antes de que se produzca la pérdida funcional del sistema hidráulico.

Frecuencia de ejecución

la frecuencia de inspección se establece en 250 horas de operación, alineadas con el plan de mantenimiento existente y con los registros históricos de recurrencia del modo de falla.

Esta periodicidad permite detectar la degradación del filtro con suficiente anticipación, reduciendo la probabilidad de detenciones no programadas.

Responsable y nivel de intervención

La tarea puede ser ejecutada por personal de mantenimiento mecánico durante ventanas de mantenimiento planificado, sin requerir detención completa del equipo en su etapa de monitoreo.

Impacto esperado de la tarea

La aplicación sistemática de esta tarea se espera que:

- Reduzca la frecuencia de ocurrencia del modo de falla MF1.1.
- Disminuye las horas de indisponibilidad asociadas al sistema hidráulico.
- Contribuye a mejorar la disponibilidad física del equipo dentro de los márgenes operacionales existentes.

Tabla resumen de la tarea de mantenimiento RCM2

Como base en el análisis del modo de falla MF1.1 y en la aplicación del árbol de decisión de RCM2, se define a continuación la tarea de mantenimiento seleccionada.

Esta tarea cumple con los criterios técnicos y económicos establecidos por la metodología RCM2 y se resume en la siguiente tabla, de acuerdo con el formato recomendado por la norma SAE JA1011. (SAE, 2011)

Elemento	Descripción
Sistema	Hidráulico
Modo de falla	MF1.1 – Obstrucción parcial de filtros hidráulicos
Falla funcional	Pérdida de presión y caudal hidráulico
Tipo de consecuencia	Operacional
Tipo de tarea	Mantenimiento basado en condición
Descripción de la tarea	Monitoreo de presión diferencial, alarmas de restricción y análisis de aceite
Frecuencia	Cada 250 h de operación
Nivel de intervención	Inspección / reemplazo preventivo
Responsable	Mantenimiento mecánico
Objetivo de la tarea	Prevenir pérdida funcional del sistema hidráulico
Impacto esperado	Reducción de indisponibilidad y mejora de confiabilidad

Tabla 11: Resumen de la tarea de mantenimiento propuesto

La tarea definida permite actuar antes de que el modo de falla evolucione hacia una falla funcional completa, evitando detenciones no programadas del equipo.

Al tratarse de una tarea basada en condición, su implementación no requiere modificaciones mayores al plan de mantenimiento vigente, sino un fortalecimiento de las actividades de monitoreo y control del sistema hidráulico.

Verificación económica de la tarea de mantenimiento seleccionada

Con el fin de validar la conveniencia económica de la tarea de mantenimiento definida para el modo de falla MF1.1, se realiza una verificación económica simplificada.

Esta verificación compara el costo de ejecutar la tarea preventiva propuesta con el costo asociado a una detención no planificada del sistema hidráulico de forma cualitativa, considerando tanto el tiempo de reparación como el impacto operacional del equipo.

1. MF1.1:

- MTTR \approx 8 h
- Indisponibilidad anual \approx 360 h
- Sistema crítico: Hidráulico

2. Tarea propuesta:

- Inspección/monitoreo de condición
- Reemplazo preventivo de filtros

Tabla de verificación económica simple

Concepto	Valor de referencia	Comentario
Duración detención no planificada	\approx 8 h	Asociada a MF1.1
Costo horario de detención	Alto	Equipo crítico de carguío
Costo de falla no planificada	Elevado	Incluye pérdida productiva + reparación
Costo de tarea preventiva	Bajo	Inspección + reemplazo programado
Relación costo-beneficio	Favorable	El costo preventivo es menor que el correctivo

Tabla 12: Verificación económica simplificada

Del análisis cualitativo se observa que el costo asociado a una detención no planificada del sistema hidráulico es significativamente mayor que el costo de ejecutar la tarea preventiva propuesta considerando la criticidad del equipo y el impacto operacional.

En consecuencia, la tarea seleccionada cumple con el criterio de validación económica exigida por la metodología RCM2, justificando su implementación como parte del plan de mantenimiento optimizado.

Impacto esperado del plan de mantenimiento propuesto

Situación base

El modo de falla MF1.1 Obstrucción parcial de filtros hidráulicos fue identificado como el más crítico del equipo mediante el diagrama Jack Knife, ubicándose en el cuadrante de mayor criticidad debido a su combinación de alta recurrencia y elevado a tiempo medio de reparación.

De acuerdo con los datos obtenidos en el análisis:

- Número de fallas anuales (N): 45 fallas/año
- Tiempo medio de reparación (MTTR): 8 h
- Indisponibilidad anual asociada:

$$H_{base} = N \times MTTR = 45 \times 8 = 360 \text{ h/año}$$

Este valor representa una contribución significativa a la indisponibilidad total del equipo, afectando directamente su desempeño operacional y la continuidad del proceso de carguío.

Escenario esperado con la aplicación del plan RCM2

La aplicación de la metodología RCM2 permite transformar fallas correctivas no planificadas en tareas de mantenimiento basadas en condición y actividades preventivas programadas.

En el caso del MF1.1, La implementación de monitoreo por condición (presión diferencial, inspección de filtros y análisis de aceite) apunta principalmente a:

- Reducir la recurrencia de fallas (N) mediante detección temprana.
- Disminuir el MTTR al intervenir de forma planificada, con repuestos y recursos disponibles.

Dado que el plan aún no ha sido implementado en operación real, el impacto se evalúa mediante escenarios de mejora esperada, basados en reducciones porcentuales conservadoras y realistas. (Moubray, J., 1997) (SAE, 2011)

Comparación base vs escenarios de mejora

A fin de complementar el análisis técnico, se incorpora una comparación económica asociada al modo de falla MF1.1, considerando únicamente los costos directos de repuestos relacionados con el sistema de filtración hidráulica.

Los escenarios presentados representan reducciones esperadas en la frecuencia de fallas y en el tiempo medio de reparación producto de la aplicación de tareas definidas mediante la metodología RCM2.

Escenario	N (fallas/año)	MTTR (h)	Indisponibilidad (h/año)	Costo repuestos por evento (UF)	Costo anual repuestos (UF)	Ahorro vs Base (UF)	Costo de pérdida de producción (USD/hora)	Pérdida producción anual (USD)	Ahorro vs base
Situación base	45	8	360	14,9	671		50000	18.000.000	
Conservador (-10%)	41	7,2	≈ 295	14,9	611,4	59,6	50000	14.750.000	3.250.000
Medio (-20%)	36	6,4	≈ 230	14,9	536,8	134,2	50000	11.500.000	6.500.000
Favorable (-30%)	32	5,6	≈ 179	14,9	477,2	193,8	50000	8.950.000	9.050.000

Tabla 13: Comparación estado base vs mejora obtenida con plan propuesto

Impacto esperado sobre indicadores de mantenimiento

A partir de los escenarios analizados, se espera que la aplicación del plan de mantenimiento propuesto genere los siguientes efectos:

- Reducción de la indisponibilidad anual asociada al MF1.1, entre un 18% y un 50%, dependiendo del nivel de efectividad alcanzado.
- Mejora del MTTR efectivo, al disminuir el tiempo de diagnóstico, espera de repuestos y preparación de trabajos.
- Incremento marginal de la disponibilidad física del equipo, al reducir la contribución del modo de falla más crítico.
- Disminución del costo correctivo, al reemplazar intervenciones reactivas por tareas planificadas de menor costo unitario.

Estos resultados no representan valores garantizados, si no una estimación técnica del impacto esperado, coherente con la literatura de mantenimiento y con la lógica de la metodología RCM2.

Alcance de la comparación económica

Cabe destacar que el análisis se centra exclusivamente en el modo de falla MF1.1, identificado como el más crítico del equipo.

Por lo tanto, la comparación económica no corresponde al costo total anual del mantenimiento del equipo completo, sino al impacto específico de optimizar el mantenimiento de este modo de falla.

Una evaluación global del ahorro total del equipo requeriría la aplicación del mismo enfoque y otros modos de falla relevantes, lo cual queda fuera del alcance del presente estudio.

Alcances y limitaciones del estudio

El presente trabajo se desarrolló con base en información operacional y de mantenimiento disponible para la pala hidráulica Komatsu PC 5500, enfocándose en el análisis detallado de un modo de falla crítico identificado mediante el diagrama Jack Knife.

El alcance del estudio se limitó a la aplicación de la metodología de RCM2 sobre el modo de falla MF1.1, seleccionado por su alto impacto sobre la indisponibilidad del equipo. En consecuencia, los resultados obtenidos representan una optimización focalizada y no una reestructuración completa del plan de mantenimiento del equipo en su totalidad.

Asimismo, la evaluación del impacto económico y operacional del plan propuesto corresponde a una estimación técnica basada en escenarios esperados, dado que la implementación práctica del mantenimiento optimizado y su validación en operación real no forman parte del alcance del presente trabajo.

A pesar de estas limitaciones, el análisis desarrollado permite demostrar la aplicabilidad y utilidad de la metodología RCM2 como herramienta de optimización del mantenimiento, entregando una base técnica sólida para futuras implementaciones y evaluaciones en terreno.

Conclusiones

El presente trabajo de título tuvo como objetivo proponer una estrategia de mantenimiento de la pala hidráulica Komatsu PC5500 mediante la aplicación de la metodología RCM2, con el fin de reducir los costos asociados y mejorar los indicadores de confiabilidad y disponibilidad del equipo.

En una primera etapa, se analizó la importancia operacional del equipo dentro del proceso de carguío minero, utilizando indicadores de desempeño tales como MTBF, MTTR, disponibilidad, y costos de mantenimiento, lo que permitió contextualizar su rol crítico dentro del sistema productivo. Así mismo, se identificaron y describieron los principales modos de fallas del equipo mediante un análisis FMECA, estableciendo una base técnica para el desarrollo posterior del estudio.

Posteriormente, se realizó la jerarquización de los modos de falla mediante el diagrama Jack Knife, utilizando criterios cuantitativos de número de falla y tiempo medio de reparación. Este análisis permitió identificar el modo de falla MF1.1 como el evento de mayor criticidad, al concentrar una fracción significativa de la indisponibilidad anual del equipo.

Sobre la base de esta jerarquización. Se aplicó la metodología RCM2 al modo de falla crítico seleccionado, utilizando el árbol de decisión para definir la estrategia de mantenimiento más adecuada. El análisis condujo a la selección de una tarea de mantenimiento basada en condición, cumpliendo con los criterios técnicos y económicos establecidos por la normativa vigente.

Finalmente, se evaluó el impacto esperado del plan de mantenimiento propuesto mediante una comparación entre la situación base y de escenarios de mejora plausibles. Los resultados muestran que la aplicación de mantenimiento optimizado tiene el potencial de reducir de manera significativa la indisponibilidad asociada al modo de falla crítico, mejorando el MTTR Efectivo y disminuir los costos correctivos, contribuyendo a un incremento global de la disponibilidad del equipo.

Desde el punto de vista económico y productivo, la reducción de la disponibilidad anual asociada al modo de falla MF1.1 tienen un impacto directo en la producción del proceso de carguío. En la situación base, con aproximadamente 360 horas de indisponibilidad anual y considerando un costo referencial del orden de 50000 USD por hora de detención, la pérdida anual de producción alcanza valores cercanos a 18 millos USD. Al aplicar el plan de mantenimiento optimizado, los escenarios de mejora permiten reducir dicha indisponibilidad a aproximadamente 295 horas 230 horas y 179 horas Anuales para los escenarios conservador, medio y favorable, respectivamente.

Estas reducciones se traducen en pérdidas anuales de producción del orden de 14.75 millones USD, 11.5 millones USD y 8.95 millones USD, Lo que implica ahorros económicos aproximado de 3.25 millones USD, 6.5 millones USD y 9.05 millones USD Anuales en comparación con la situación base. Estos resultados evidencian que la mejora en la disponibilidad del equipo tiene un efecto económico significativo, reforzando la convivencia ciencia de la aplicación de tareas de mantenimiento basado en condición para el modo de falla crítico analizado.

En conjunto la reducción de la disponibilidad anual y los ahorros económicos directos asociados al modo de falla MF1.1, tanto por disminución de pérdidas de producción como

por reducción de costos correctivos, permiten evaluar técnica y económicamente la aplicación de la metodología RCM2, demostrando que la propuesta desarrollada constituye una mejora sustentable y económicamente justificable para la operación de la pala hidráulica Komatsu PC 5500.

En conclusión, el estudio demuestra que la aplicación sistemática de la metodología RCM2, apoyada en herramientas de jerarquización como el diagrama Jack Knife, constituye una estrategia potencialmente efectiva del mantenimiento en equipos de gran minería, entregando una base técnica sólida para futuras implementaciones y validaciones en operación real.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se proponen las siguientes recomendaciones para dar continuidad y profundizar la aplicación de la metodología RCM2 en la pala hidráulica Komatsu PC 5500:

1. Extender la aplicación de la metodología RCM2 a otros modos de falla relevantes, identificados en el diagrama Jack Knife, tales como MF2.2 (Obstrucción en líneas de lubricación centralizada) y MF1.4 (Filtros de combustible saturados), con el fin de optimizar progresivamente el plan de mantenimiento del equipo a nivel sistémico.
2. Implementar en operación real el plan de mantenimiento basado en condición definido para el modo de falla MF1.1, con el objetivo de validar en terreno los escenarios de mejora estimados, evaluando la evolución de indicadores como MTTR, disponibilidad física y costos de mantenimiento.

3. Fortalecer las estrategias de monitoreo de condición, incorporando seguimiento de tendencias de presión diferencial, análisis sistemático de aceite y alarmas tempranas, lo que permitiría anticipar la degradación de los filtros hidráulicos y reducir aún más la recurrencia de fallas.
4. Realizar una evaluación económica de ciclo de vida (LCCA) asociada a la aplicación extendida de RCM2, considerando inversiones en monitoreo, repuestos y mano de obra, con el fin de cuantificar el impacto económico global de la optimización del mantenimiento en el largo plazo.
5. Utilizar la metodología desarrollada como base para futuros estudios, aplicándola a otros equipos críticos del proceso de carguío y transporte, permitiendo estandarizar criterios de análisis de confiabilidad y toma de decisiones en mantenimiento.

Estas recomendaciones permiten proyectar el trabajo realizado, demostrando que la aplicación de la metodología RCM2 constituye una herramienta replicable y escalable para la optimización del mantenimiento en equipos de gran minería

Alcances y proyecciones del estudio

El presente trabajo se desarrolló a partir de información operacional y de mantenimiento disponible para la pala hidráulica Komatsu PC 5500, Con un enfoque focalizado en el análisis detallado de un modo de fallo críticos identificados mediante el diagrama Jack Knife.

El alcance del estudio se limitó a la aplicación de la metodología RCM2 exclusivamente sobre el modo de falla MF1.1 (obstrucción parcial de filtros hidráulicos), seleccionado por su alto impacto en la indisponibilidad del equipo. En consecuencia, los resultados obtenidos corresponden a una optimización puntual del plan de mantenimiento y no a una reestructuración integral de mantenimiento del equipo completo.

Asimismo, la evaluación del impacto técnico y económico del plan propuesto se realizó a partir de escenarios de mejora esperados, basados en supuestos conservadores y en literatura técnica, debido a que la implementación del plan en operación real y la validación de resultados medidos en terreno quedan fuera del alcance del presente trabajo.

Como proyección, el estudio establece una base metodológica replicable para futuras aplicaciones de RCM2 en otros modos de falla y equipos críticos del proceso productivo, permitiendo ampliar el análisis hacia una optimización progresiva del mantenimiento y una evaluación económica de mayor alcance en estudios posteriores.

Anexos

Los datos utilizados en el presente estudio provienen de registros operacionales y de mantenimiento interno de la pala hidráulica Komatsu PC5500, suministrados por la minera correspondiente y procesados por el autor para el desarrollo del análisis.

Referencias

IEC 60812. (2018). *IEC 60812: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*.

Geneva: International Electrotechnical Commission.

ISO 14224. (2016). *ISO 14224: Collection and exchange of reliability and maintenance data*. Geneva: International Organization for Standardization.

Komatsu Chile S.A. (2024). *Datos operacionales y de mantenimiento de pala hidráulica Komatsu PC5500 (información interna)*. Komatsu Chile S.A.

Komatsu Ltd. (s.f.). (s.f.). *Komatsu PC5500 hydraulic mining shovel: Technical documentation and maintenance guidelines*. Komatsu. Komatsu Ltd.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance (2nd ed.)*. Industrial Press.

SAE. (2011). *SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes*. SAE International. SAE International.

SAE. (2011). *SAE JA1012: A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard*. SAE International. SAE International.