



Estrategia de Mantenimiento para Equipos de Área Ripios en División Gabriela Mistral Utilizando el Enfoque RCM

Osvaldo Geronimo Augusto Alfaro Riquelme

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:

Dr.- Ing. Cristian Canales C.

Profesores Comisión:

Dr.- Ing. Emilio Dufeu D.

Dr.- Ing. Cristian Vicuña M.

Ingeniera Supervisora:

Nathalie Hemmelmann F.

Diciembre 2025
Concepción, Chile

Esta Memoria de Titulo es dedicada a José Roberto Alfaro Riquelme de parte de toda tu familia que te ama y te adora, sea donde sea que estés.

Q.E.P.D.

Agradecimientos

Inicialmente agradecer a mis padres Osvaldo y Mireya junto a mi hermana Ruth Victoria por la paciencia que tuvieron estos 24 años de mi vida soportando cada llanto, solicitud y olvido, gracias por ser los cimientos que permitieron mi desarrollo profesional durante estos años enseñándome que se puede surgir desde lo más bajo.

Mencionar de igual manera a mis sobrinos Matilda y Leon los cuales fueron una luz en esta familia brindando alegría y felicidad todos los días.

A mi tío Victor y su familia los cuales fueron un apoyo incondicional en mi vida presentándome diversos puntos de vista a lo largo de mi crecimiento.

Don Lorenzo el cual fue una figura importante en mi desarrollo educacional motivando a continuar con mis estudios. Denotando mis fortalezas.

Agradecer a Sebastián, un amigo incondicional el cual estuvo desde mis inicios en mecánica siendo un pilar importante en mi vida.

A Felipe, Jota, Joaquín y Jorge los cuales complementaron este círculo final de amistades quienes me enseñaron más sobre los límites en la universidad congeniando en los diversos gustos los cuales cada uno tiene.

A Martina quien fue un apoyo incondicional durante mis primeros años en concepción permitiendo descubrir más sobre mi vida individual y siendo una figura importante en mis años de universitario.

A todos mis compañeros los cuales conocí a lo largo de toda mi carrera que sepan que tienen un lugar dentro de mi historia de vida y no serán olvidados.

Y finalmente agradecer a toda la docencia de Ingeniería civil mecánica los cuales permiten el desarrollo libre de todos los estudiantes fomentando a su vez la creatividad y trabajo en equipo dentro de la Facultad.

Resumen

El presente trabajo aborda la mejora del desempeño de los equipos del Área Ripios en la División Gabriela Mistral mediante la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). El estudio responde a la alta frecuencia de detenciones no programadas en equipos críticos, que afectan la disponibilidad y el MTBF, generando pérdidas productivas significativas.

La metodología se estructuró en seis etapas: levantamiento del contexto operacional, recopilación de datos históricos desde SAP, desarrollo de la línea base y criticidad, ejecución del análisis FMEA para equipos críticos, selección de políticas de mantenimiento por modo de falla y, finalmente, comparación con planes vigentes y recomendaciones del fabricante. Se aplicaron herramientas como Pareto, Jack Knife, clasificación de fallas, análisis manual de OT y revisión experta con Confiabilidad y Ejecución para validar la representatividad y coherencia de los hallazgos.

Los resultados evidencian que las fallas hidráulicas y en sistemas de desplazamiento concentran el mayor impacto, principalmente por brechas organizacionales y problemas de repuestos. La implementación de la estrategia propuesta permitiría aumentar la disponibilidad en 1 punto porcentual (equivalente a 7,5 horas mensuales) y la producción en un 3%. El estudio destaca la importancia de integrar análisis técnico, gestión organizacional y trabajo colaborativo para optimizar la confiabilidad y continuidad operacional.

Abstract

This study addresses the improvement of equipment performance in the Tailings Area at División Gabriela Mistral through the application of the Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology. The research responds to the high frequency of unplanned shutdowns in critical equipment, which negatively impact availability and MTBF, generating significant production losses.

The methodology was developed in six stages: assessment of the operational context, analysis of historical data, criticality evaluation, execution of FMEA, definition of maintenance policies, and comparison with existing plans and manufacturer recommendations.

The results show that hydraulic failures and displacement system issues have the greatest impact, mainly due to organizational gaps and spare parts problems. Implementing the proposed strategy would increase availability by 1 percentage point (equivalent to 7.5 hours per month) and production by 3%. The study highlights the importance of integrating technical analysis, organizational management, and collaborative work to optimize reliability and operational continuity.

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas.....	2
Nomenclatura	3
1 Introducción	4
1.1 Contexto Corporación Nacional del Cobre (CODELCO)	4
1.1.1 CODELCO División Gabriela Mistral	4
1.1.2 Departamento de Mantenimiento	4
1.2 Planteamiento del problema.....	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivos específicos	7
1.5 Metodología.....	7
2 Marco Teórico	8
2.1 Términos y Referencias.....	8
2.2 Documentación Aplicada	9
2.2.1 ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016 [9].	9
2.3 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).....	11
2.4 Análisis de Criticidad	11
2.5 Análisis de Modos de Falla y Efectos FMEA.....	13
2.6 Diagrama de Pareto	13
2.7 Diagrama de Jack-Knife	13
2.8 SAP	13
3 Resultados.....	14
3.1 Contexto Operacional Equipos Área Ripios	14
3.1.1 Rotopala	14
3.1.2 Puente Recuperador	16
3.1.3 Hopper Car 1	18
3.1.4 Hopper Car 2	20
3.1.5 Tripper Car.....	22
3.1.6 Spreader	24
3.2 Línea Base y Criticidad	26

3.3	Modos de Fallas Equipos	32
4	<i>Discusión</i>	36
5	<i>Conclusiones</i>	37
	<i>Referencias</i>	38

Lista de Figuras

Figura 1. Layout de Área. (Fuente: Manual de Bolsillo Área Seca, CODELCO) [2].	5
Figura 2. Ejemplo Grafico Limites de Batería Bomba. (Fuente: ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016) [9].	10
Figura 3. Jerarquía de Equipos según directriz. (Fuente: ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016) [9].	10
Figura 4. Formato Categorización de datos por equipo. (Fuente: ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016) [9].	11
Figura 5. Matriz de evaluación de Impacto. (Fuente: Libro SOMA) [1].	12
Figura 6. Indicadores influyentes en matriz consecuencia. (Fuente: Libro SOMA) [1].	12
Figura 7. Matriz consecuencia y modo de obtención. (Fuente: Libro SOMA) [1].	12
Figura 8. Límites de Batería definidos en Rotopala. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	15
Figura 9. Límites de Batería definidos en Puente Recuperador. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	17
Figura 10. Límites de Batería definidos en Hopper Car 1. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	19
Figura 11. Límites de Batería definidos en Hopper Car 2. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	21
Figura 12. Límites de Batería definidos en Tripper Car. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	23
Figura 13. Límites de Batería Spreader. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	25
Figura 14. Cantidad de Fallas porcentuales en cada equipo (2022-2025). (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	26
Figura 15. Horas de Falla en cada equipo durante los años 2022 a 2025. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	27
Figura 16. Diagramas de Pareto en cada equipo durante los años 2022 a 2025. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	30
Figura 17. Jack Knife modo de falla Área Ripios durante los años 2022 a 2025. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	32
Figura 18. Procesamiento de datos actividades correctivas e inmediatas. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	34
Figura 19. Modos de Fallas Obtenidos a través de Actividades por ocurrencia de Falla. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	34
Figura 20. Estrategia de mantenimiento realizada en base a Modos de Fallas. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	35

Lista de Tablas

Tabla 1. Información General Rotopala Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	14
Tabla 2. Parámetros Clave Rotopala Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	14
Tabla 3. Componentes Principales Rotopala Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	15
Tabla 4. Información General Puente Recuperador Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	16
Tabla 5. Parámetros Clave Puente Recuperador Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	17
Tabla 6. Componentes Puente Recuperador Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	17
Tabla 7. Información General Hopper Car 1, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	18
Tabla 8. Parámetros Clave Hopper Car 1 Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	19
Tabla 9. Componentes Hopper Car 1, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	19
Tabla 10. Información General Hopper Car 2, Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	20
Tabla 11. Parámetros Clave Puente Hopper Car 2, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	21
Tabla 12. Componentes Hopper Car 2, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	21
Tabla 13. Información General Tripper Car Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	22
Tabla 14. Parámetros Clave Tripper Car Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	22
Tabla 15. Componentes Tripper Car Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	23
Tabla 16. Información General Spreader Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	24
Tabla 17. Parámetros Clave Spreader Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	24
Tabla 18. Información específica Spreader. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	25
Tabla 19. Cantidad de Fallas por año Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	26
Tabla 20. Horas de Falla por año Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).	27

Nomenclatura

$MTBF$	: Mean Time Between Failure
$MTTR$	: Mean Time To Repair
N_f	: Número de Fallas
T_f	: Tiempo de reparación
T_{rep}	: Tiempo total de Reparación
H_c	: Horas Calendario
H_{falla}	: Horas Debido a Falla
H_{mtto}	: Horas Debido a Mantenimiento Programado
S	: Severidad
O	: Ocurrencia
D	: Detectabilidad

1 Introducción

1.1 Contexto Corporación Nacional del Cobre (CODELCO)

Codelco es la principal empresa minera de cobre en el mundo y un pilar de la economía chilena. Fue fundada en 1976 como resultado de la nacionalización del cobre en Chile, consolidándose como una única empresa estatal a través de sus distintas divisiones.

Su misión actual es maximizar el valor económico, social y ambiental, contribuyendo de manera sostenible mediante la minería del cobre y sus subproductos.

Sus cifras más relevantes presentadas entre los periodos de enero a junio de 2025 destacan producción de 634 mil toneladas de cobre, un aporte al fisco de US\$ 814 millones.

1.1.1 CODELCO División Gabriela Mistral

La División Gabriela Mistral, establecida en 2008 como mina a rajo abierto, se ubica en la Región de Antofagasta, comuna de Sierra Gorda, a 2.660 metros sobre el nivel del mar. Destaca por su flota de extracción 100% autónoma, una dotación femenina del 20% y un 8% de trabajadores pertenecientes a pueblos originarios. En 2024 alcanzó una producción de 103 mil toneladas de cobre fino.

El ciclo productivo comienza con la extracción del material desde la mina, que se transporta al chancado primario y posteriormente al stockpile. Luego, el material pasa por los chancadores secundario y terciario, donde se reduce a un tamaño adecuado para su procesamiento. A continuación, se traslada al área de acidificación, donde se adiciona ácido sulfúrico y agua para la lixiviación. De esta etapa se obtiene la solución rica en cobre, que tras el proceso de electroobtención produce finalmente cátodos de cobre para su distribución.

1.1.2 Departamento de Mantenimiento

El departamento de mantenimiento de la División Gabriela Mistral, específicamente el área de Confiabilidad en el sector Área Seca ahondando en Área Ripios, se rige por la guía del Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA). Esta guía establece un conjunto de estándares y procedimientos respaldados por el sistema de Gestión C+, orientado a mejorar los indicadores de proceso, aumentar el coeficiente de marcha y reducir costos mediante la optimización en la gestión de activos.

Su propósito es garantizar cero accidentabilidades y promover la sustentabilidad ambiental en cada acción ejecutada. Además, busca abarcar las etapas más relevantes del ciclo de gestión de activos, desde la definición de la estrategia de mantenimiento de equipos hasta el análisis del fin de vida del activo, implementando procesos, roles y funciones conforme al sistema C+ [1].

1.2 Planteamiento del problema

El material extraído por la Rotopala (220-RC-001) se descarga en la correa 220-CV-001. Desde allí, mediante el Hopper Car 1 (220-BN-001), pasa a la correa 220-CV-002, acoplada al Puente Recuperador (220-ME-001). Luego, el flujo es transferido al Hopper Car 2 (220-BN-002), que permite la descarga hacia la correa 220-CV-003. A continuación, el material avanza por el tren de correas hasta la correa 220-CV-006, conectada al Tripper Car (220-TB-001), que lo transfiere mediante la correa 220-CV-007 hacia la correa 220-CV-008 del Spreader (220-ME-002), donde finalmente se deposita en el botadero, cerrando el ciclo del proceso (Figura 1).

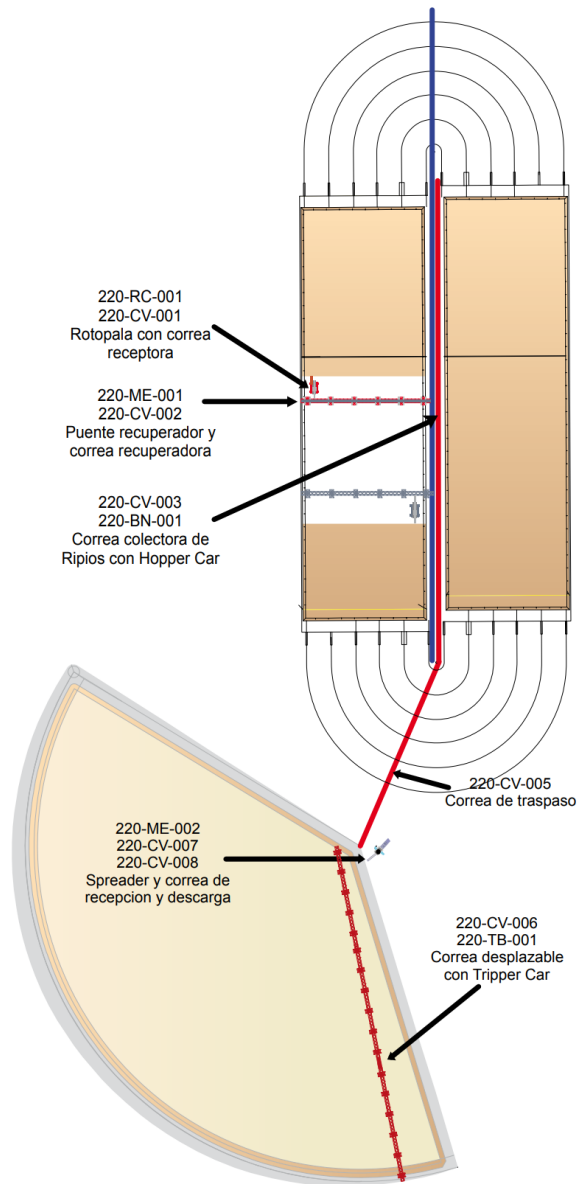


Figura 1. Layout de Área. (Fuente: Manual de Bolsillo Área Seca, CODELCO) [2].

La División Gabriela Mistral cuenta con un único sector para apilamiento y remoción, por lo que la detención de equipos en el Área Ripios genera pérdida de espacio disponible, disminuyendo la capacidad de lixiviación y afectando la producción del Área Seca. Para mantener la operación, es indispensable asegurar la continuidad de ambos procesos, considerando además una distancia mínima de 15 m entre el Spreader y la Rotopala para garantizar el funcionamiento normal del sistema.

A pesar de existir un plan de mantenimiento planificado, se registra una alta frecuencia de fallas mecánicas con recurrencia diaria. La línea base 2025 indica 373 detenciones y un tiempo acumulado cercano a 327 horas, principalmente en la Rotopala, el Spreader y el tren de correas. Esta situación obliga a realizar intervenciones reactivas, afectando la programación y aumentando el consumo de recursos, lo que impacta directamente en la continuidad operacional.

Dada la criticidad del Área Ripios, se propone redefinir la estrategia de mantenimiento, priorizando los equipos con mayor incidencia de fallas y tiempo de reparación, con el objetivo de mejorar parámetros clave de confiabilidad y disponibilidad.

La literatura aborda esta problemática desde enfoques clásicos de RCM (reliability-centered maintenance), que estructuran la definición de funciones y modos de falla en sistemas clave con evaluación de consecuencias y probabilidades de ocurrencia, hasta desarrollos que incorporan innovaciones operacionales como la consideración explícita de restricciones de operación [3], el trabajo con cuadrillas simultáneas para reducir indisponibilidades [4] y la optimización de las políticas de mantenimiento para mejorar el desempeño y los costos del sistema [5]. En paralelo, destacan avances basados en datos e inteligencia artificial, donde surgen RCM híbridos que combinan índices de condición e importancia y, mediante algoritmos de IA, automatizan la priorización al reemplazar umbrales definidos por expertos por análisis sobre información real e históricos de fallas, permitiendo evaluar la condición técnica y la criticidad del sistema y clasificar con mayor precisión las prioridades de mantenimiento [6]. Complementariamente, se reportan iniciativas de digitalización como Maintenance Advisor (MA), que integra manuales, registros y logs de mantenimiento para reducir errores de diagnóstico y facilitar la transición desde un esquema preventivo hacia uno predictivo [7]; y, en la fase inicial del proceso RCM, se proponen herramientas para la identificación y priorización de componentes críticos, como el Weighted Importance Index (WI), que integra métricas de confiabilidad y costo de interrupciones para focalizar recursos donde generan mayor impacto [8].

1.3 Hipótesis

Se plantea implementar un RCM orientado al ámbito mecánico en los equipos críticos del Área Ripios, con el objetivo de reducir la frecuencia de fallas y las horas de reparación, incrementando la disponibilidad para cumplir con el plan anual.

1.4 Objetivos

Diseñar e implementar estrategias de mantenimiento basadas en RCM para los equipos mecánicos del Área Ripios, vinculados al Área Seca de la División Gabriela Mistral. Estas estrategias se sustentan en los modos de falla más frecuentes, con el fin de reducir detenciones y tiempos entre fallas, aumentando la disponibilidad y cumpliendo los compromisos definidos en la línea base.

1.4.1 Objetivos específicos

OE1: Alinear el trabajo con normativas y directrices internas según los estatutos SOMA y C+, levantando el contexto operacional mediante funciones, estándares de desempeño, restricciones, condiciones ambientales y límites de batería de los equipos críticos, generando fichas técnicas validadas como insumo para el RCM.

OE2: Construir y validar la línea base de los equipos utilizando parámetros clave de mantenimiento que permitan priorizar su criticidad. Con esta información, ejecutar el análisis FMEA para definir un conjunto de tareas por modo de falla.

OE3: Seleccionar políticas de mantenimiento por modo de falla considerando restricciones operativas, comparando con recomendaciones de fabricantes, planes vigentes y observaciones de operadores, para su implementación efectiva.

1.5 Metodología

Actividad 1: Inducción a procesos y reglamentos corporativos.

Se realizará la capacitación formal para trabajo en terreno en DGM, abordando normas de seguridad, medio ambiente y calidad, estándares SOMA/C+ [1], roles y responsabilidades en el Área Ripios, además del uso básico de los sistemas de gestión (SAP/CMMS y repositorios internos). Al cierre se contará con constancias de inducción, acreditaciones vigentes y accesos operativos habilitados.

Actividad 2: Contexto operacional y parámetros clave de los equipos (RCM).

Para cada equipo crítico del Área Ripios (Rotopala, carros tolva, puente recuperador, carro repartidor y Spreader) se definirán funciones, estándares de desempeño y restricciones operativas. El levantamiento se realizará mediante entrevistas con Operaciones y Mantenimiento, revisión de manuales y recorridos en terreno, generando fichas técnicas y el mapa de límites de batería como insumo para la línea base, FMEA y selección de estrategias.

Actividad 3: Línea base y criticidad.

Se recopilará información histórica (2022-2025) desde SAP y documentación divisional, obteniendo datos de fallas, detenciones y MTBF por equipo. Los datos serán depurados y validados con responsables, aplicando análisis de Pareto por horas de detención y caracterización de fallas mediante Jack Knife según frecuencia. El resultado será una línea base trazable y un ranking de criticidad consensuado con Mantenimiento para orientar el enfoque RCM.

Actividad 4: FMEA por equipo crítico.

Con base en el ranking, se elaborará el FMEA identificando funciones, fallas funcionales, modos de falla, causas y efectos. Se priorizarán mediante esquema ponderado alineado a SOMA [1] y la criticidad levantada, registrando tareas de mantenimiento candidatas por modo. Las matrices FMEA serán revisadas y validadas por el área de Confiabilidad como insumo para definir políticas de mantenimiento.

Actividad 5: Selección de estrategia por modo de falla.

A partir del FMEA y considerando restricciones operativas y de recursos, se definirá la estrategia más efectiva para cada modo de falla (mantenimiento basado en condición, correctivo o preventivo). Se especificarán frecuencias, equipos a trabajar y componente en cuestión.

Actividad 6: Comparativa de la estrategia de mantenimiento con similares.

Se realizará un análisis comparativo entre la estrategia propuesta, las recomendaciones del fabricante, el plan vigente y observaciones de ingenieros de turno. Se evaluarán tareas, frecuencias y criterios frente a causas raíz identificadas para detectar brechas y oportunidades de mejora.

2 Marco Teórico

2.1 Términos y Referencias

Mantenimiento: Conjunto de operaciones y cuidados destinados a conservar, restaurar o mejorar el funcionamiento de activos de una organización, mediante la corrección de fallas o la prevención de su aparición. Este proceso se clasifica en las siguientes categorías:

- **Mantenimiento correctivo:** Se ejecuta para reparar averías una vez ocurridas, ya sea de forma inmediata tras la detección del daño o diferida, siempre que no afecte el proceso productivo.
- **Mantenimiento Preventivo:** Orientado a anticipar fallas mediante tareas programadas, evitando averías en el equipo.
- **Mantenimiento Basado en Condición:** Se fundamenta en la monitorización continua del estado del equipo para predecir fallas y aplicar acciones antes de que ocurran.

Tiempo medio entre fallas MTBF: Representa el tiempo promedio entre dos fallas consecutivas en un equipo reparable, definido por la ecuación (1).

$$MTBF = \frac{T_{op}}{N_f} \quad (1)$$

MTTR (Mean Time To Repair): Indica el tiempo promedio requerido para reparar un equipo desde la detección de la falla hasta su liberación, según la ecuación (2).

$$MTTR = \frac{T_{rep}}{N_f} \quad (2)$$

Disponibilidad: Es la capacidad de un activo para cumplir su función bajo condiciones establecidas en un tiempo determinado, considerando recursos externos. Se clasifica en:

- **Disponibilidad física:** Tiempo que el sistema puede operar sin fallas, sin incluir mantenimientos programados.
- **Disponibilidad Inherente:** Incluye mantenimientos correctivos y programados, considerando MTBF y MTTR.
- **Disponibilidad operativa:** Considera todos los factores que afectan la operación, incluyendo mantenimientos, ajustes y paradas externas.

En Codelco, se utiliza un modelo similar a la disponibilidad inherente como métrica general, calculada mediante tiempos de falla, mantenimientos programados y no programados, además del tiempo calendario, según la ecuación (3).

$$Disponibilidad(\%) = \frac{(H_c - H_{falla} - H_{mtto})}{H_c} \quad (3)$$

2.2 Documentación Aplicada

2.2.1 ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016 [9].

establece directrices para la recopilación y aseguramiento de la calidad de datos de confiabilidad y mantenimiento en sectores industriales. Su objetivo principal es estandarizar la información necesaria para análisis de diseño, seguridad, disponibilidad, costos del ciclo de vida y planificación del mantenimiento, garantizando datos consistentes y comparables entre plantas, fabricantes y contratistas.

La metodología propuesta enfatiza la verificación y validación de datos para asegurar su integridad. Además, introduce el concepto de límites de batería, que define las subunidades e interfaces del equipo y su interacción con el entorno, permitiendo filtrar información irrelevante. Un ejemplo de este esquema se muestra en la Figura 2.

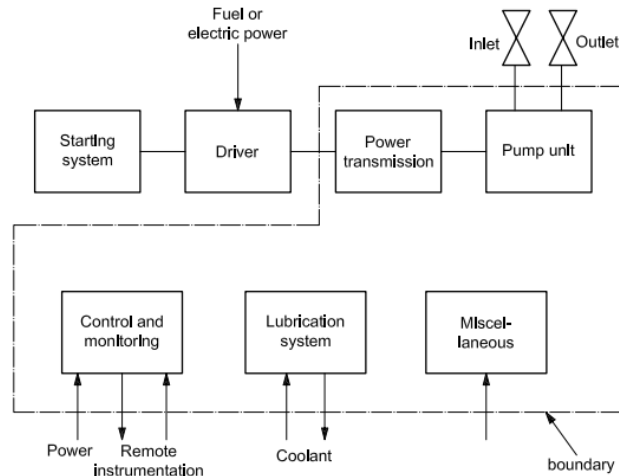


Figura 2. Ejemplo Grafico Limites de Batería Bomba. (Fuente: ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016) [9].

Posteriormente, la norma establece una jerarquía para la clasificación de equipos, desde el nivel industrial hasta componentes individuales, lo que facilita la estructuración del análisis según la complejidad requerida (Figura 3) [9].

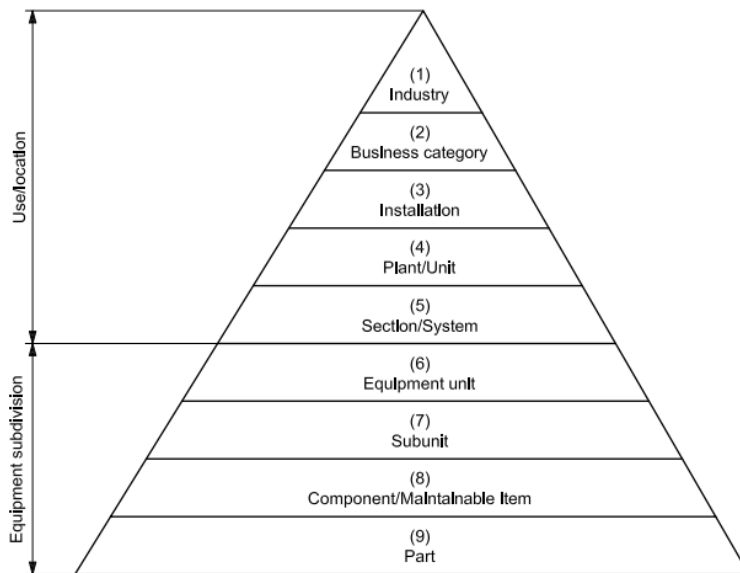


Figura 3. Jerarquía de Equipos según directriz. (Fuente: ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016) [9].

Finalmente, se propone un formato normalizado para la categorización de datos, que incluye atributos de identificación, diseño y operación. Este enfoque asegura la trazabilidad y uniformidad en la gestión de información técnica (Figura 4).

Data category	Data	Taxonomic level ^a	Business category (examples)			
			Upstream (E & P)	Midstream	Downstream (refining)	Petrochemical
Use/ Location attributes	Industry	1	Petroleum	Natural gas	Petroleum	Petrochemical
	Business category (*)	2	E & P	Midstream	Refining	Petrochemical
	Installation category	3	Oil/gas production	Pipeline	Refinery	Petrochemical
	Installation code or name (*)	3	Delta	Beta gas line	Charlie refinery	Delta chemical
	Owner code or name	4	Smith Ltd.	Johnsen Inc.	JPL Corp.	ABC ASA
	Geographic location	3	UKCS	Europe	Mid-west USA	UK
	Plant/Unit category (*)	4	Oil/gas platform	Compressor station	Hydro-cracker	Ethylene cracker
	Plant/Unit code or name (*)	4	Alpha 1	CS 3	HH 2	EC 1
	Section/System (see Annex A) (*)	5	Oil processing	Compression	Reaction	Reaction system
	Operation category	5	Remote control	Remote control	Manned	Manned

Figura 4. Formato Categorización de datos por equipo. (Fuente: ISO 14224: Industrias de petróleo y gas natural – Colección e intercambio de Fiabilidad Y Mantenimiento 3ra ed., 2016) [9].

2.3 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

El RCM es una metodología que permite definir estrategias de mantenimiento basadas en la criticidad y el desempeño esperado de un sistema o activo. Este procedimiento se rige principalmente por la norma SAE JA1011 [10], la cual establece que el análisis debe considerar los modos de falla, sus efectos y consecuencias, vinculándolos a tareas específicas para su control.

El proceso se desarrolla respondiendo las siguientes preguntas clave:

- ¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo presente?
- ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones?
- ¿Que ocasiona cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando se produce cada falla en particular?
- ¿De qué modo afecta cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra el plan de acción apropiado?

2.4 Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad se basa en los parámetros definidos por el sistema SOMA: Seguridad (P1), Medioambiente (P2), Producción (P3) y Costos de Mantenimiento (P4). Cada uno se evalúa mediante escalas específicas que permiten cuantificar el impacto potencial de una falla (Figura 5).

	P1 Seguridad ¹	P2 Medioambiente	P3 Producción	P4 Costos de mantenimiento
Definición	Consecuencias potenciales que podría tener una falla para la seguridad de las personas hasta las comunidades vecinas.	Consecuencias sobre el medioambiente – en las instalaciones de Codelco o en áreas próximas – para el aire, el agua y/o la tierra.	Pérdidas o paradas de producción que pueden ocurrir como consecuencias potenciales de una falla.	Costos de mantenimiento en los cuales se incurre para restituir la función afectada por la ocurrencia de la falla.
Evaluación de impacto	40 pts. Riesgo de accidente con fatalidades múltiples.	40 pts. Riesgo de daño medioambiental severo y de largo plazo.	12 pts. Pérdida de producción mayor a un día.	10 pts. Costos muy altos (ej.: sobre los US\$ 500.000)
	38 pts. Riesgo de accidente con una fatalidad.	32 pts. Riesgo de daño de largo plazo.	8 pts. Pérdida de producción entre 12 horas y un día.	8 pts. Costos altos (ej.: entre US\$ 100.000 y US\$ 500.000)
	30 pts. Riesgo de accidente con discapacidad permanente.	28 pts. Riesgo de daño de corto plazo.	4 pts. Pérdida de producción de entre dos y 12 horas.	5 pts. Costos medios (ej.: entre US\$ 50.000 y US\$ 100.000)
	12 pts. Riesgo de accidente con tiempo perdido.	10 pts. Riesgo de daño medioambiental menor.	2 pts. Pérdida de producción de hasta dos horas.	2 pts. Costos bajos (ej.: entre US\$ 10.000 y US\$ 50.000)
	0 pts. Sin riesgo para las personas.	0 pts. Sin daño al medioambiente.	0 pts. Sin pérdida de producción.	1 pt. Costos muy bajos (ej.: US\$ 10.000)
Puntaje de evaluación: P1 + P2 + P3 + P4				

Figura 5. Matriz de evaluación de Impacto. (Fuente: Libro SOMA) [1].

A partir de esta evaluación se construye la matriz de consecuencias, que asigna un indicador a cada activo según el puntaje obtenido. Posteriormente, se determina la frecuencia de ocurrencia de fallas (Figura 6), lo que permite calcular el índice de criticidad mediante la relación entre consecuencia y frecuencia (Figura 7).

Este procedimiento facilita la clasificación de los activos en niveles de criticidad **alta**, **media** o **baja**, orientando la priorización de recursos y la definición de estrategias de mantenimiento más efectivas.

Puntaje de evaluación de consecuencias	Indicador de consecuencias	Frecuencia de ocurrencia de falla	Indicador de frecuencia
Consecuencia total sobre 38	6	Ocurren fallas diariamente	6
Consecuencia total mayor o igual a 28 y menor a 38 o consecuencia en producción igual a 12	5	Ocurren fallas una vez por semana	5
Consecuencia mayor o igual a 20 y menor a 28	4	Ocurren fallas una vez al mes	4
Consecuencia mayor o igual a 10 y menor a 20	3	Ocurren fallas una vez cada seis meses	3
Consecuencia total mayor o igual a 4 y menor a 10	2	Ocurren fallas una vez al año	2
Consecuencia total inferior a 4	1	Ocurren fallas una vez cada 10 años	1

Figura 6. Indicadores influyentes en matriz consecuencia. (Fuente: Libro SOMA) [1].

Puntaje de evaluación de consecuencias	Indicador de consecuencias	Indicador ABC SAP
Consecuencia x Frecuencia > 10	Alta	A
4 < Consecuencia x Frecuencia ≤ 10	Media	M
Consecuencia x Frecuencia es ≤ 4	Baja	B

Consecuencia	6	6	12	18	24	30	36
	5	5	10	15	20	25	30
	4	4	8	12	16	20	24
	3	3	6	9	12	15	18
	2	2	4	6	8	10	12
	1	1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6
		Frecuencia de falla					
		Criticidad = Consecuencia x Frecuencia de falla					
		● Alta ● Media ● Baja					

Figura 7. Matriz consecuencia y modo de obtención. (Fuente: Libro SOMA) [1].

2.5 Análisis de Modos de Falla y Efectos FMEA

El FMEA es una técnica que permite identificar y priorizar los modos de falla con mayor riesgo. El análisis comienza con la definición de las funciones del sistema y sus fallas funcionales. A cada modo de falla se le asigna un Número Prioritario de Riesgo (NPR), calculado como:

$$NPR = S \cdot O \cdot D \quad (4)$$

Donde S es severidad, O ocurrencia y D detectabilidad. Un NPR elevado indica mayor prioridad para la acción correctiva. En este estudio se aplica el método de criticidad definido por el libro SOMA.

2.6 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es una herramienta utilizada para caracterizar los modos de falla según su frecuencia. Bajo el principio 80/20, establece que el 80% de las fallas proviene del 20% de los modos existentes. Su elaboración requiere recopilar los modos de falla y su frecuencia en un periodo definido, permitiendo visualizar la concentración de fallas y priorizar acciones.

2.7 Diagrama de Jack-Knife

Este método clasifica los modos de falla mediante un gráfico logarítmico que relaciona el tiempo medio de reparación y la frecuencia de ocurrencia. El diagrama se divide en cuadrantes que identifican fallas agudas (larga duración), crónicas (alta frecuencia), agudas-crónicas (alta duración y frecuencia) y bajo control. Esta herramienta facilita la priorización de modos críticos para mejorar la confiabilidad y disponibilidad del activo.

2.8 SAP

SAP es un sistema de gestión integral que permite administrar procesos clave como mantenimiento, finanzas, inventarios y producción. En Codelco, el mantenimiento se gestiona mediante SAP S/4, que soporta la creación y control de órdenes de trabajo, programación, notificaciones y análisis de desempeño con base en datos históricos. Actualmente, la información se encuentra distribuida entre SAP R/3 (históricos hasta mediados de 2025) y SAP S/4, plataforma vigente desde la segunda mitad de 2025.

3 Resultados

3.1 Contexto Operacional Equipos Área Ripios

A partir de manuales de usuario y condiciones divisionales y según la norma ISO 14224 [9], se realizó la identificación de los equipos presentes en área ripios, el resultado se puede observar en los siguientes subcapítulos. Cada uno contiene información general, además de parámetros estándares de funcionamiento, límites de batería y subsistemas que componen cada equipo.

3.1.1 Rotopala

Equipo inicial en el proceso de remoción de ripios, trasladado desde la División Radomiro Tomic para aumentar la capacidad de transporte en Gabriela Mistral. Se presenta información general y parámetros operativos relevantes (Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1. Información General Rotopala Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Datos	Descripción
División	Gabriela Mistral
Ubicación técnica	PSEC-EPR-MRI-ROT
Ubicación Física	Área Ripios
Clase de Equipo	Rotopala
TAG	ROT
Sistema	Remoción de Ripios
Tipo de Equipo	ROTOPALA HR 7100
Identificación Equipo	220-RC-001
Fabricante	TAKRAF
Fecha de inicio operación	2018
Estado Operativo normal	Running

Tabla 2. Parámetros Clave Rotopala Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Parámetro	Magnitud	Unidad
Tonelaje Procesado	9291	t/h
Densidad del Material	1.52-1.57	t/m3
Velocidad de Avance Orugas	13.5	m/min
Potencia Motriz Rueda Excavadora	710	kW

Revoluciones por minuto	4	Rpm
Fuerza Tangencial	183	kN
Capacidad Caparacho	2400	lt

El límite de batería definido para Rotopala se presenta en el diagrama de la Figura 8. De esta definición se establecen los subsistemas a tratar desglosando a su vez las principales partes que lo componen (Tabla 3).

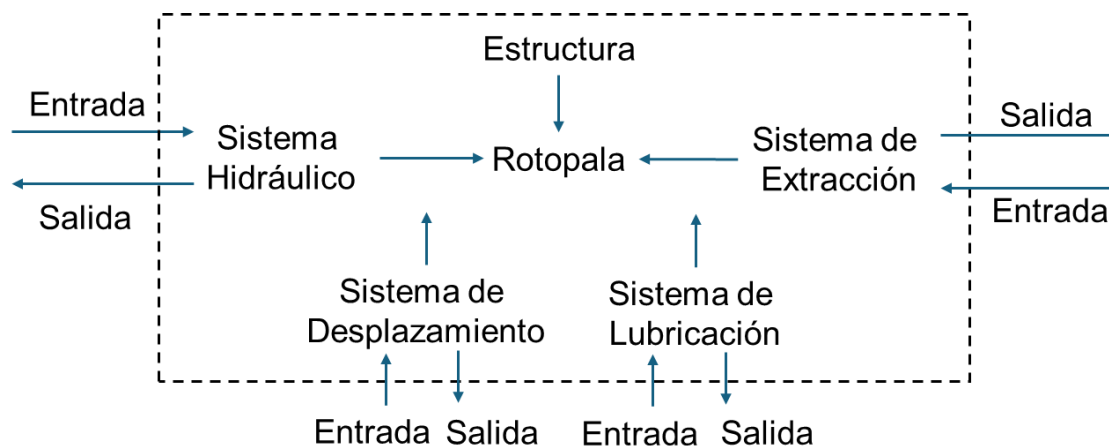


Figura 8. Límites de Batería definidos en Rotopala. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Tabla 3. Componentes Principales Rotopala Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Subsistema	Componente
Rueda de Capachos	Freno Giro Rotopala
	Cono
	Disco
	Capachos
	Placas de desgaste
	Riñón
	Eje de Rodado
Sistema Hidráulico y Lubricación	Bombas
	Válvulas
	Filtros
	Microfiltrador
	Tanques contenedores
	Cilindro Tensor
	Cilindro de Nivelación
Orugas de Desplazamiento	Líneas Rígidas y Flexibles
	Cubierta con Brida lado motor
	Cubierta con Brida lado transmisión

	Eje Articulado
	Sistema de Transmisión
	Zapatas
	Eslabones
	Sprocket
	Rueda Guía Delantera
	Rodillos Inferiores
	Rodillos Superiores
Estructura	Estructura de Acero para orugas
	Escaleras
	Barandas
	Cuadros de Acero
	Pasillos
	Puertas
	Guardapiés
	Vigas

3.1.2 Puente Recuperador

El Puente Recuperador es una estructura autopropulsada por orugas, ubicada bajo la correa 2. Su función principal es permitir el avance de la Rotopala tras completar la remoción de ripios en la pila. Este equipo debe soportar el material descargado, por lo que se consideran las propiedades del material y el comportamiento del sistema de orugas. Abarcando esta información inicial en la Tabla 4 y Tabla 5 a continuación.

Tabla 4. Información General Puente Recuperador Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Datos	Descripción
División	Gabriela Mistral
Ubicación técnica	PSEC-EPR-MRI-AXR-ME1
Ubicación Física	Área Ripios
Clase de Equipo	Puente Recuperador
TAG	ME1
Sistema	Transporte de Ripios
Tipo de Equipo	Recovery Conveyor Bridge
Identificación Equipo	220-ME-001
Fabricante	TAKRAF
Fecha de inicio operación	2007
Estado Operativo normal	Running

Tabla 5. Parámetros Clave Puente Recuperador Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Parámetro	Magnitud	Unidad
Tonelaje Procesado	9291	t/h
Densidad del Material	1.52-1.57	t/m3
Distancia entre orugas	2.9	m
Inclinación Máxima	5.7	°
Potencia Motor Eléctrico	20	kW
Velocidad Máxima de desplazamiento	9	m/min
Margen de desalineación Máxima en operación	500	mm
Margen de desalineación Máxima fuera de operación	1000	mm

El diagrama de límites de batería (Figura 9) define el alcance del equipo y sus interfaces, mientras que la Tabla 6 detalla los subsistemas y componentes principales:

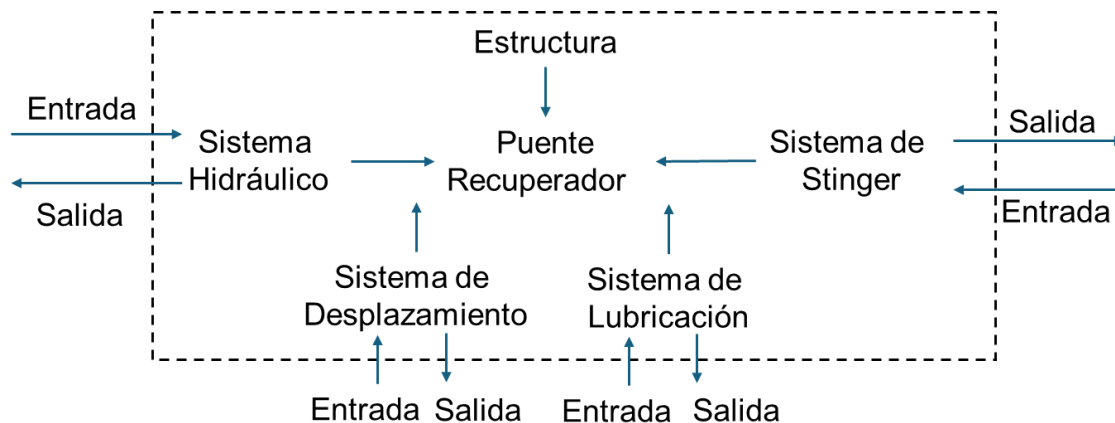


Figura 9. Límites de Batería definidos en Puente Recuperador. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Tabla 6. Componentes Puente Recuperador Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Subsistema	Componente
Orugas de Desplazamiento	Cubierta con Brida lado motor
	Cubierta con Brida lado transmisión
	Eje Articulado
	Sistema de Transmisión
	Zapatillas
	Eslabones
	Sprocket
	Rueda Guía Delantera
	Rodillos Inferiores
	Rodillos Superiores

Sistema de Desplazamiento (Riel)	Brazo de Torque
	Ruedas
	Unión mecánica
	Fijador riel
	Protecciones
	Tambor Cable Alimentación
	Sistema Amortiguación
Cadena Stinger	Cadena Guía
	Brazo de Torque
	Rodamiento y Rueda dentada Cadena
Estructura	Marcos Estructurales
	Techo Protector
	Protector Eje Articulado
	Estructura Orugas y Puente
	Escaleras
	Barandas
	Pasillos
	Guardapiés
Sistema Hidráulico y Lubricación	Bombas
	Válvulas
	Filtros
	Microfiltrador
	Tanques contenedores
	Cilindro Tensor
	Líneas Rígidas y Flexibles

3.1.3 Hopper Car 1

El Hopper Car 1 (220-BN-001) está instalado en el puente de descarga y se encarga de transferir el ripio desde la correa 220-CV-001 hacia la correa móvil 220-CV-002 durante la remoción de ripios. Este equipo cumple una función crítica en la continuidad del proceso, por lo que se detalla su información técnica (Tabla 7), parámetros operativos (Tabla 8), límites de Batería (Figura 10) y componentes principales (Tabla 9).

Tabla 7. Información General Hopper Car 1, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Datos	Descripción
División	Gabriela Mistral
Ubicación técnica	PSEC-EPR-MRI-CTF-01N
Ubicación Física	Área Ripios
Clase de Equipo	Tolva de Descarga
TAG	CTF-01N
Sistema	Transferencia entre Correas

Tipo de Equipo	Rail Mounted Hopper Car
Identificación Equipo	220-BN-001
Fabricante	TAKRAF
Fecha de inicio operación	2006
Estado Operativo normal	Running

Tabla 8. Parámetros Clave Hopper Car 1 Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Parámetro	Magnitud	Unidad
Velocidad de desplazamiento	13.5	m/s
Tonelaje Procesado	9291	t/h
Densidad del Material	1.52-1.57	t/m3

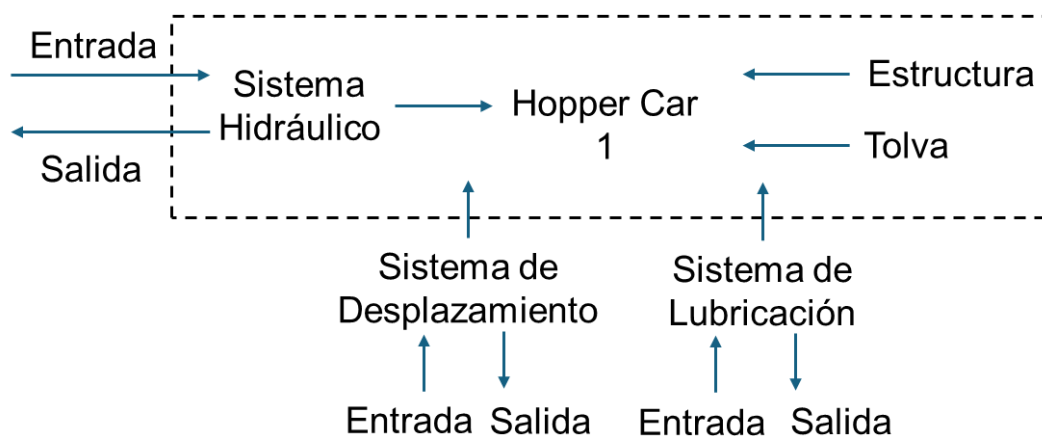


Figura 10. Límites de Batería definidos en Hopper Car 1. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Tabla 9. Componentes Hopper Car 1, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Subsistema	Componente
Sistema de Desplazamiento (Riel)	Bogie de ruedas simple y doble
	Brazo de Torque
	Ruedas 315 mm
	Unión mecánica
	Fijador riel
	Protecciones
	Tambor Cable Alimentación
	Sistema Amortiguación

Tolva	Placas de desgaste
	Buzón
Sistema Hidráulico y Lubricación	Sistema de Frenado
	Válvulas
	Filtros
	Tanques contenedores
	Líneas Rígidas y Flexibles
Estructura	Soporte Carro Hopper
	Techos Protectores
	Soporte Cables
	Tambor Cable de Alimentación
	Escaleras
	Barandas
	Pasillos
	Soporte Ruedas Simple y Doble

3.1.4 Hopper Car 2

El Hopper Car 2 (220-BN-002) está instalado en el puente de descarga y transfiere el ripio desde la correa 220-CV-002 hacia la correa móvil 220-CV-003 durante la remoción de ripios. Al igual que el Hopper 1 presentando su información técnica, parámetros operativos y componentes principales.

Tabla 10. Información General Hopper Car 2, Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Datos	Descripción
División	Gabriela Mistral
Ubicación técnica	PSEC-EPR-MRI-CTF-002
Ubicación Física	Área Ripios
Clase de Equipo	Tolva de Descarga
TAG	CTF-002
Sistema	Transferencia entre Correas
Tipo de Equipo	Rail Mounted Hopper Car
Identificación Equipo	220-BN-001
Fabricante	TAKRAF
Fecha de inicio operación	2006
Estado Operativo normal	Running

Tabla 11. Parámetros Clave Puente Hopper Car 2, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Parámetro	Magnitud	Unidad
Velocidad de desplazamiento	9	m/min
Tonelaje Procesado	9291	t/h
Densidad del Material	1.52-1.57	t/m3

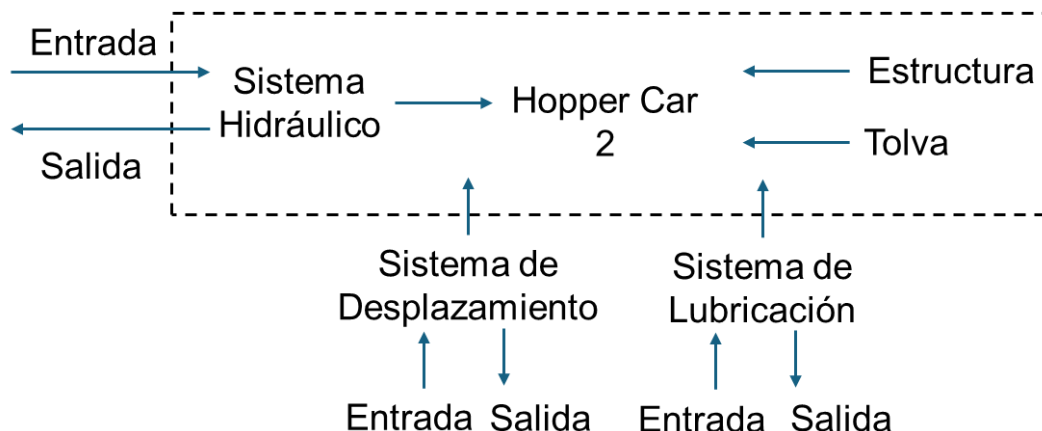


Figura 11. Límites de Batería definidos en Hopper Car 2. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Tabla 12. Componentes Hopper Car 2, Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Subsistema	Componente
Sistema de Desplazamiento (Riel)	Bogie de ruedas simple y doble
	Brazo de Torque
	Ruedas 315 mm
	Unión mecánica
	Fijador riel
	Protecciones
	Tambor Cable Alimentación
	Sistema Amortiguación
Tolva	Placas de desgaste
	Buzón
Sistema Hidráulico y Lubricación	Sistema de Frenado
	Válvulas
	Filtros
	Tanques contenedores
	Líneas Rígidas y Flexibles
Estructura	Soporte Carro Hopper
	Techos Protectores
	Soporte Cables

	Escaleras
	Barandas
	Pasillos
	Soporte Ruedas Simple y Doble

3.1.5 Tripper Car

El Tripper Car (220-TB-001) está instalado en la correa desplazable 220-CV-006 y se encarga de transferir el ripio transportado por la correa receptora 220-CV-007 del Spreader. Este equipo es clave en la continuidad del proceso de remoción, por lo que se presenta su información técnica, parámetros operativos y componentes principales.

Tabla 13. Información General Tripper Car Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Datos	Descripción
División	Gabriela Mistral
Ubicación técnica	PSEC-EPR-MRI-TRI-001
Ubicación Física	Área Ripios
Clase de Equipo	Carro Repartidor
TAG	TRI-001
Sistema	Transferencia de ripio
Tipo de Equipo	Crawler Mounted Tripper Car
Identificación Equipo	220-TB-001
Fabricante	TAKRAF
Fecha de inicio operación	2006
Estado Operativo normal	Running

Tabla 14. Parámetros Clave Tripper Car Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Parámetro	Magnitud	Unidad
Potencia Motor Eléctrico	30	kW
Velocidad de desplazamiento	9	m/min
Tonelaje Procesado	9291	t/h

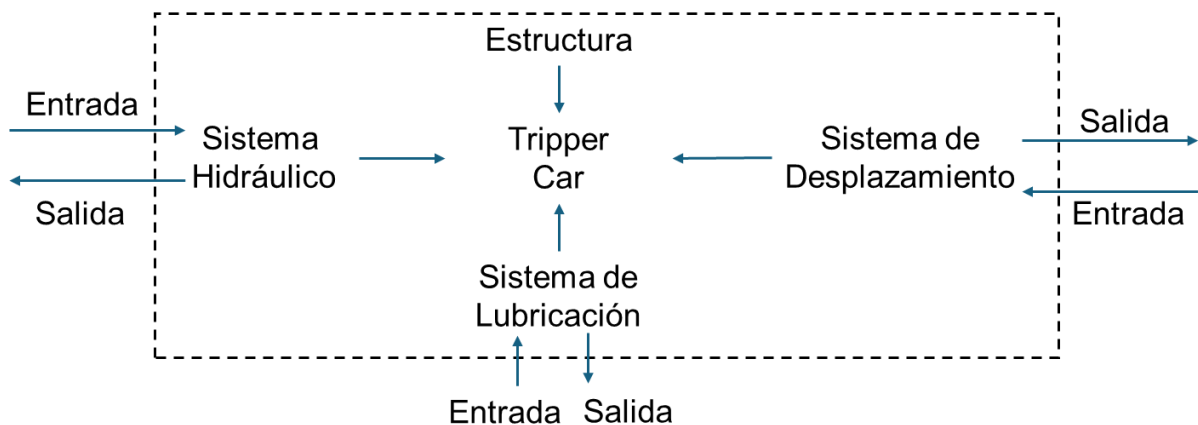


Figura 12. Límites de Batería definidos en Tripper Car. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Tabla 15. Componentes Tripper Car Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Subsistema	Componente
Orugas de Desplazamiento	Cubierta con Brida lado motor
	Cubierta con Brida lado transmisión
	Eje Articulado
	Sistema de Transmisión
	Puerto de Frenado
	Zapatas
	Eslabones
	Sprocket
	Rueda Guía Delantera
	Rodillos Inferiores
	Rodillos Superiores
Sistema Hidráulico y Lubricación	Bombas
	Válvulas
	Filtros
	Microfiltrador
	Tanques contenedores
	Cilindro Tensor
	Líneas Rígidas y Flexibles
Estructural	Tambor Cable Alimentación
	Techos Protectores
	Soporte Cables
	Escaleras
	Barandas
	Pasillos
	Junta Cardan
	Viga de Compensación
	Marcos estructurales
	Soporte Tambor

3.1.6 Spreader

El Spreader (220-ME-002) es el equipo encargado de distribuir el material retirado de las pilas de lixiviación en el botadero de ripios. Para maximizar el área de esparcido sin desplazamientos constantes, opera de forma autopropulsada junto con las correas 220-CV-007 y 220-CV-008, que permiten un giro relativo entre ambas. Desglosándose en las siguientes componentes informativas.

Tabla 16. Información General Spreader Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Datos	Descripción
División	Gabriela Mistral
Ubicación técnica	PSEC-EPR-MRI-AXR-ME2
Ubicación Física	Área Ripios
Clase de Equipo	Apilador Radial Ripios
TAG	AXR-ME2
Sistema	Transferencia de ripio
Tipo de Equipo	Ripios Dump Spreader
Identificación Equipo	220-ME-002
Fabricante	TAKRAF
Fecha de inicio operación	2007
Estado Operativo normal	Running

Tabla 17. Parámetros Clave Spreader Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Parámetro	Magnitud	Unidad
Tonelaje Procesado	9291	t/h
Densidad del Material	1.52-1.57	t/m3
Velocidad de Avance Orugas	9	m/min
Velocidad de Giro Tornamesa	16	m/min
Potencia Motor Eléctrico	25	kW

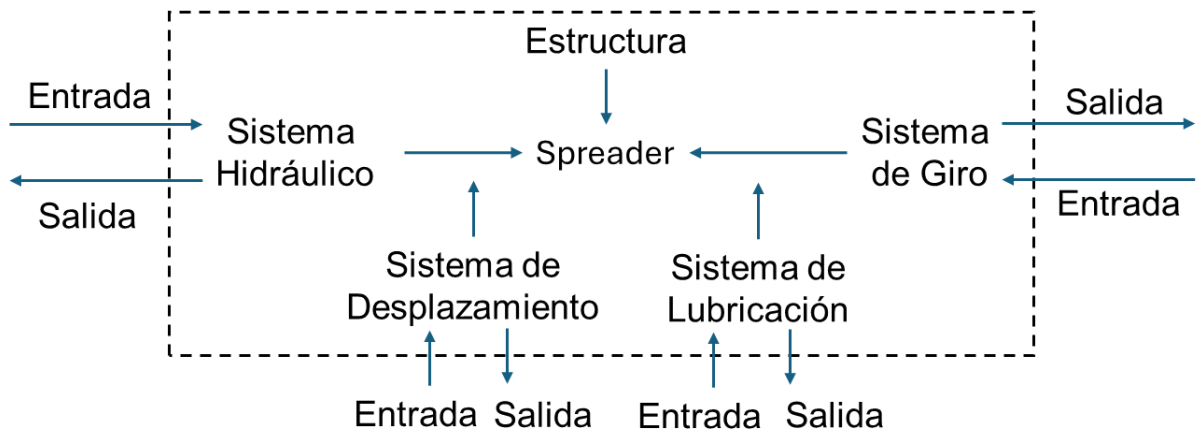


Figura 13. Límites de Batería Spreader. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Tabla 18. Información específica Spreader. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Subsistema	Componente
Orugas de desplazamiento	Apoyo de Bola Pivoteante
	Soporte Rodante
	Cubierta con Brida
	Eje Articulado
	Zapatas
	Eslabones
	Sprocket
	Rueda Guía Delantera
	Rodillos Inferiores
	Rodillos Superiores
Sistema de Giro (Tornamesa)	Piñón Corona
	Sistema Engranado
Sistema Hidráulico y Lubricación	Bombas
	Válvulas
	Filtros
	Microfiltrador
	Tanques contenedores
	Cilindro Tensor
	Cilindro Direccional
	Cilindro de Elevación Pluma
	Descarga
	Líneas Rígidas y Flexibles
Estructura	Unidad Potencia Hidráulica
	Estructura Spreader y Orugas
	Escaleras
	Barandas
	Cuadros de Acero
	Pasillos
	Puertas

3.2 Línea Base y Criticidad

Mediante la información proporcionada, se recopiló la cantidad de fallas mecánicas en el Área Ripios durante los años 2022 a 2025 tal como se presenta en la Tabla 19. Mientras que la Figura 14 indica la distribución porcentual por equipo.

Tabla 19. Cantidad de Fallas por año Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Año	Cantidad de Fallas Especialidad Mecánica
2022	117
2023	246
2024	250
2025	175

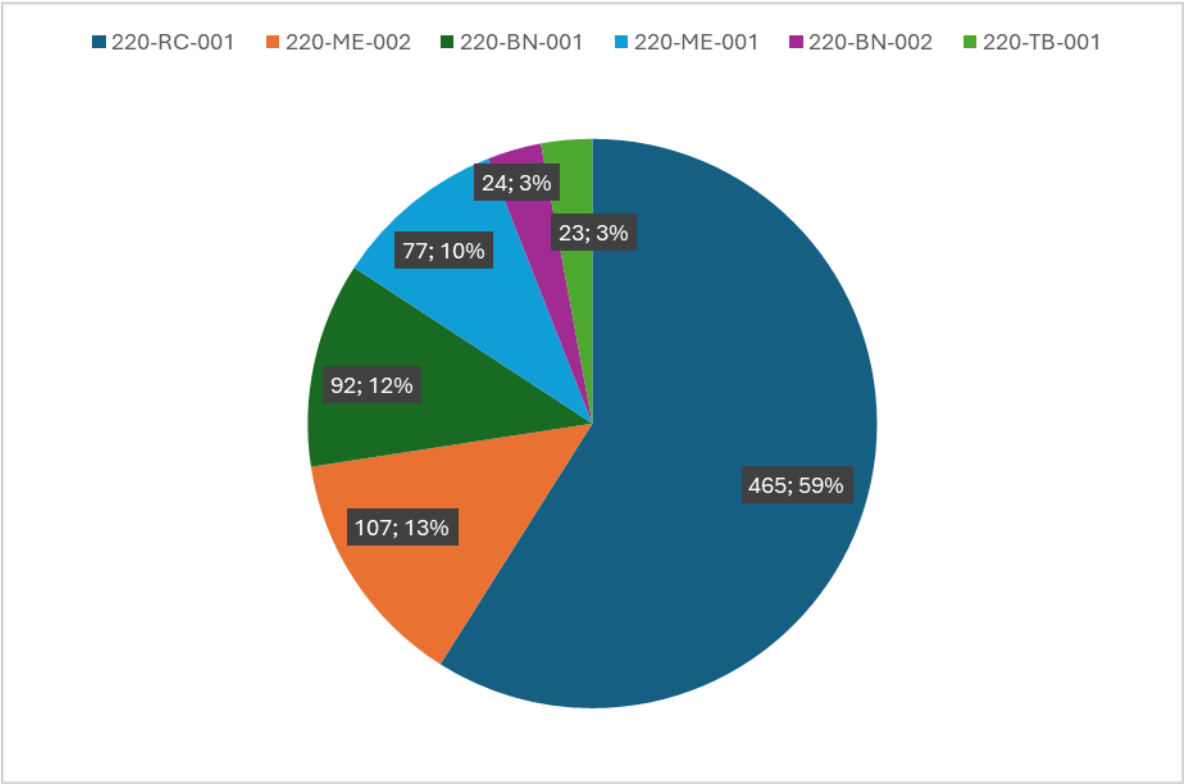


Figura 14. Cantidad de Fallas porcentuales en cada equipo (2022-2025). (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Se recopilaron las horas de falla en el Área Ripios entre 2022 y 2025, lo que permite identificar tendencias y equipos críticos. La Tabla 20 resume las horas totales por año.

Tabla 20. Horas de Falla por año Área Ripios. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Año	Horas de Falla Especialidad Mecánica
2022	175.7
2023	312.7
2024	258.3
2025	175.2

La Figura 15 corresponde al detalle las horas de falla para cada equipo durante los diferentes periodos de tiempo.

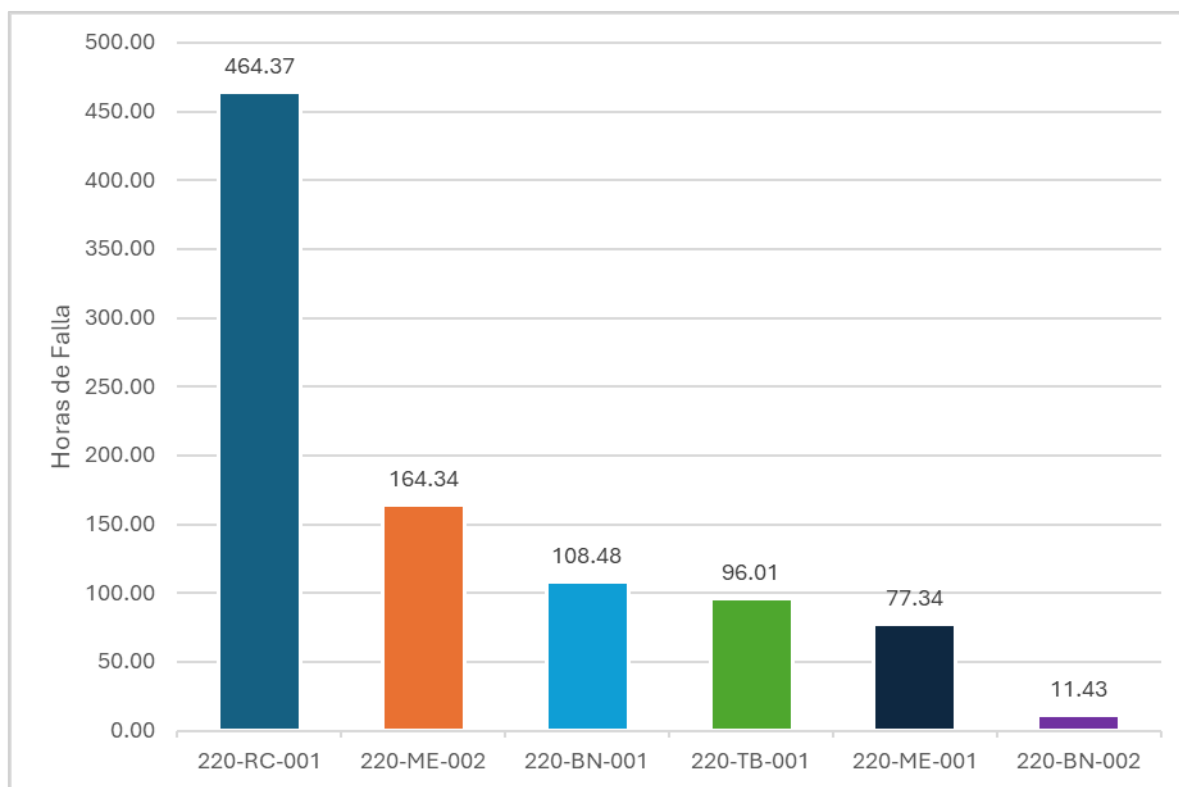
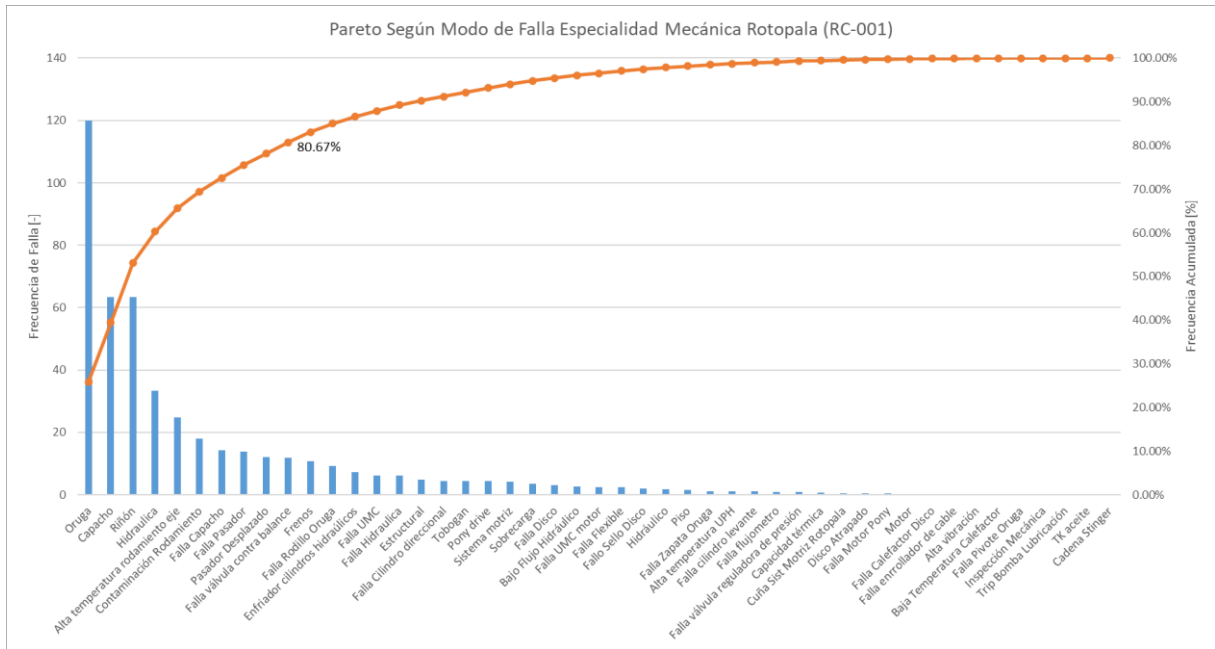
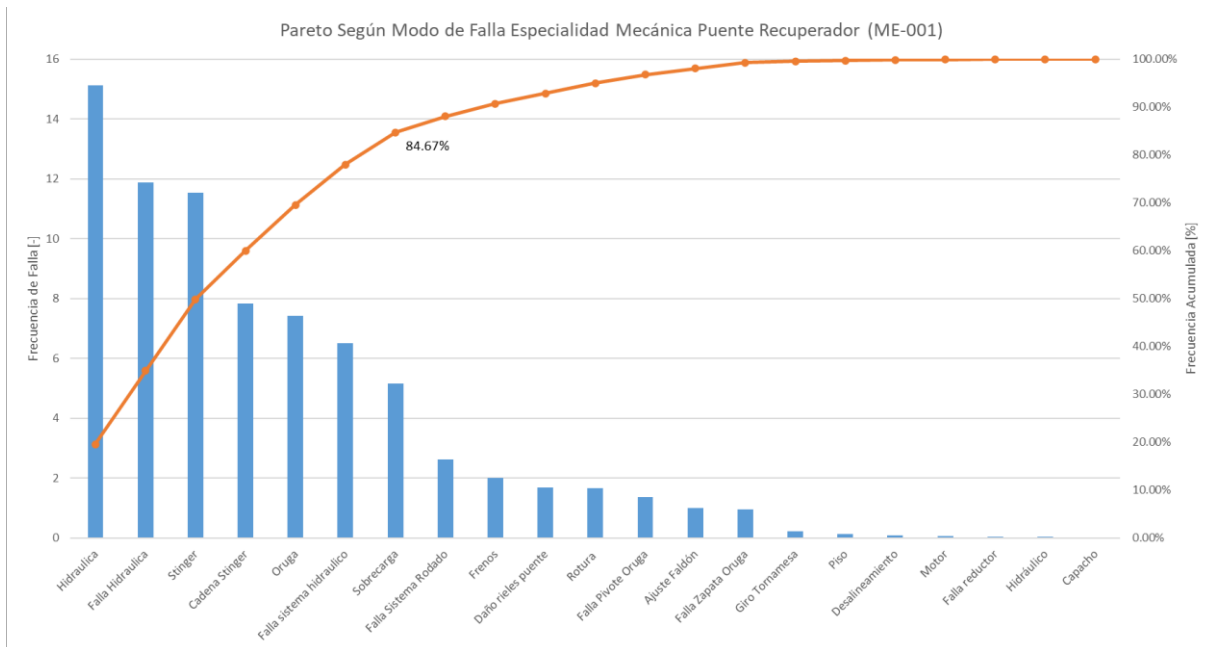


Figura 15. Horas de Falla en cada equipo durante los años 2022 a 2025. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

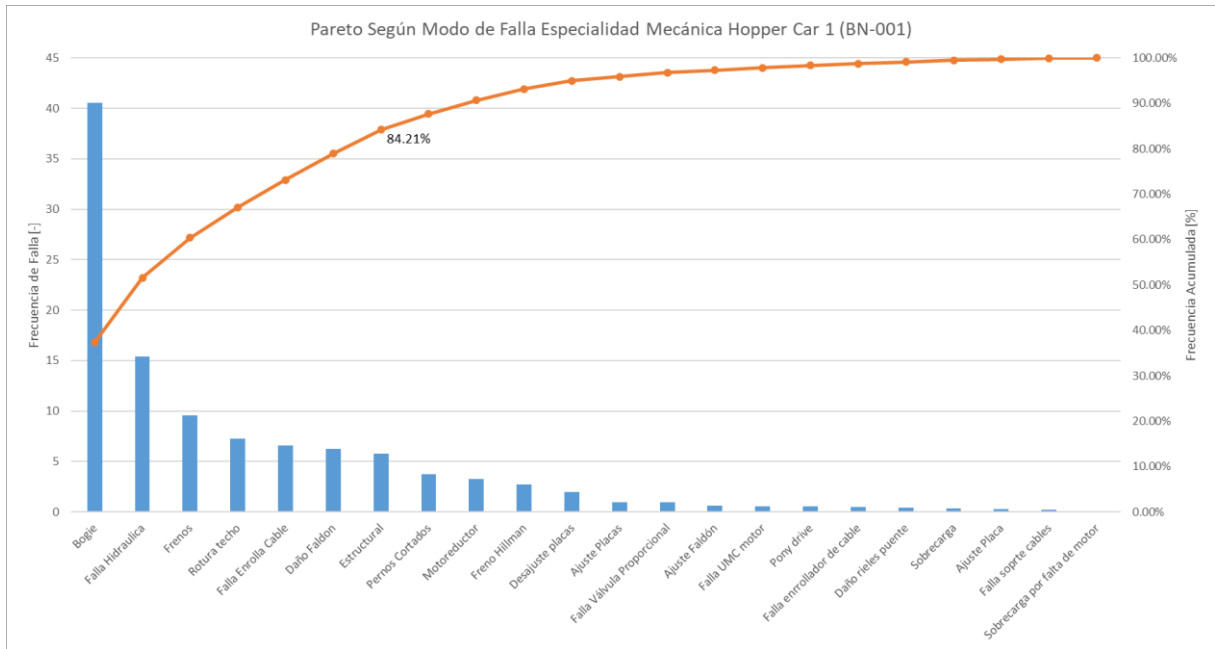
El análisis Pareto (Figura 16) muestra la concentración de fallas por equipo en el Área Ripios durante el período evaluado, permitiendo identificar los activos que generan la mayor proporción de eventos de mantenimiento.



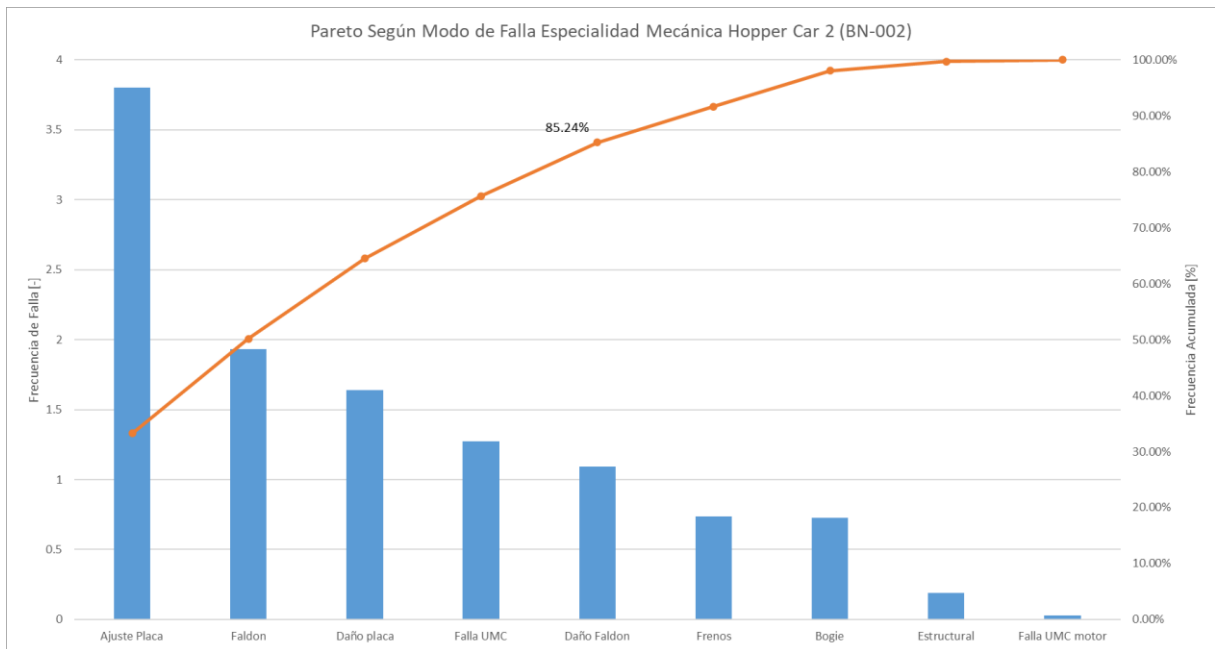
(a)



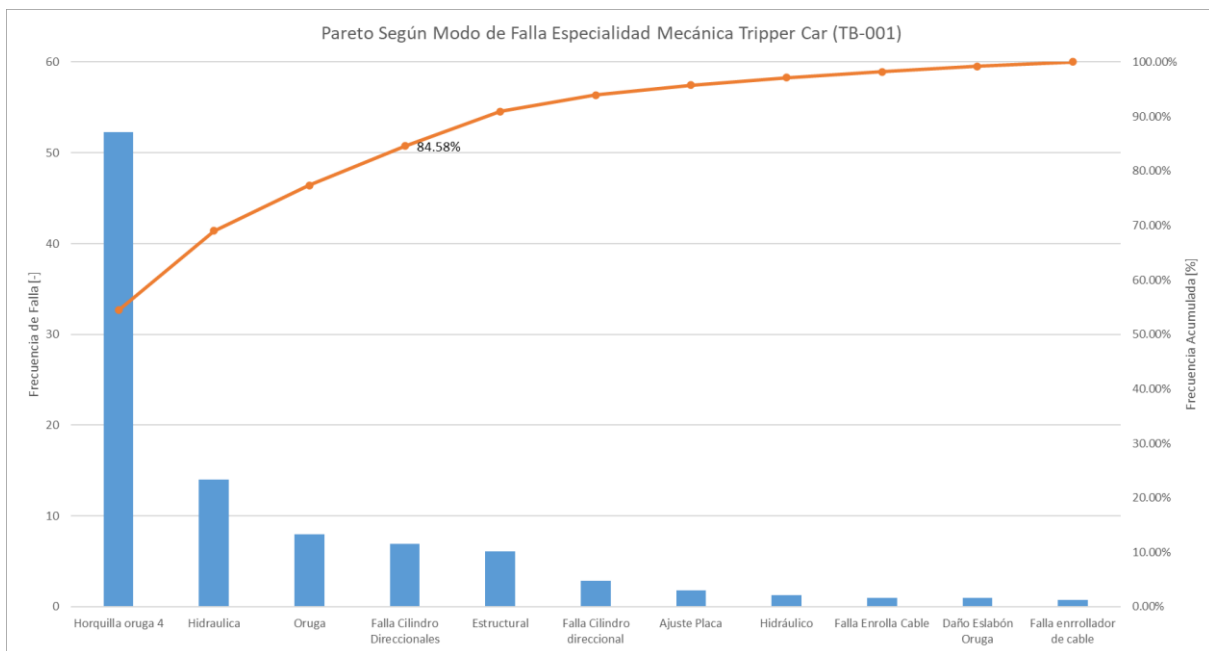
(b)



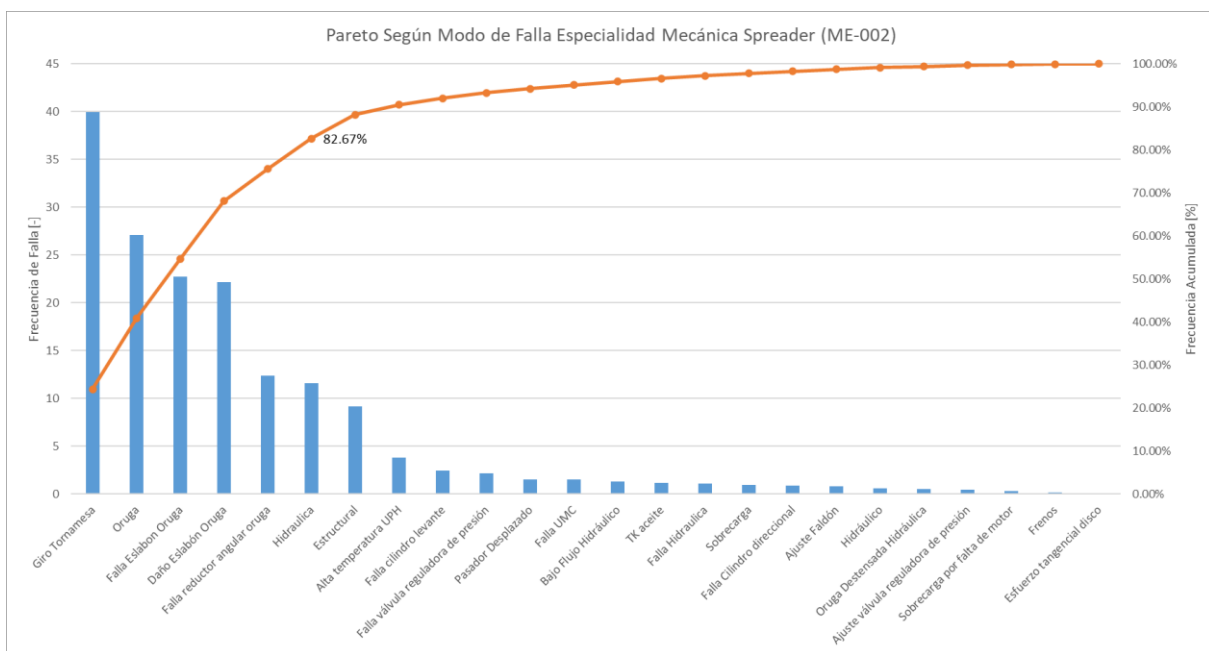
(c)



(d)



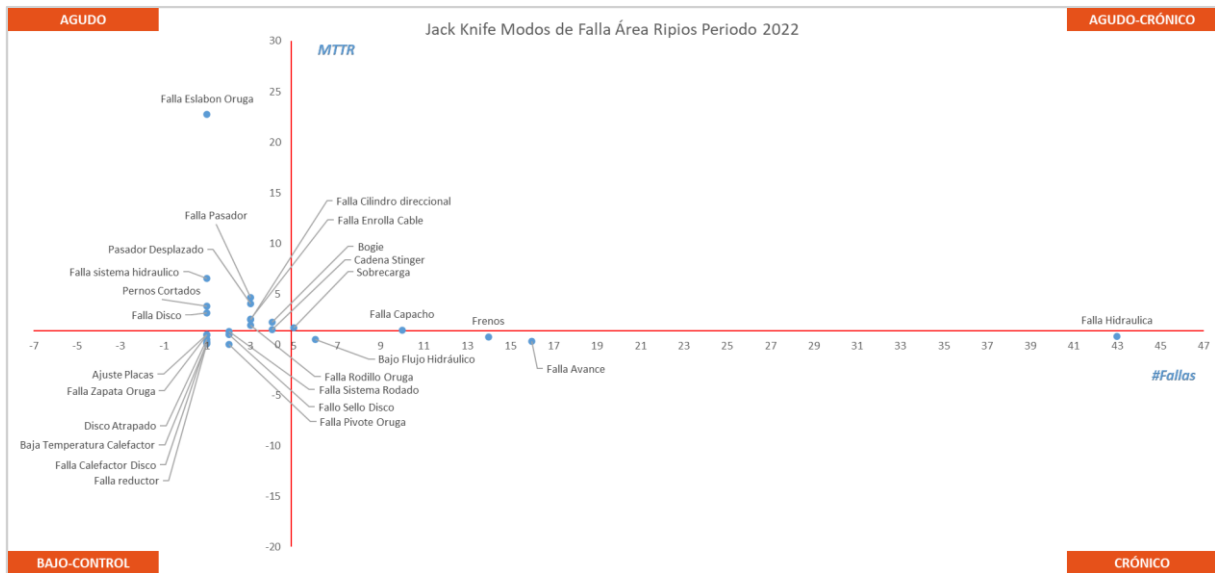
(e)



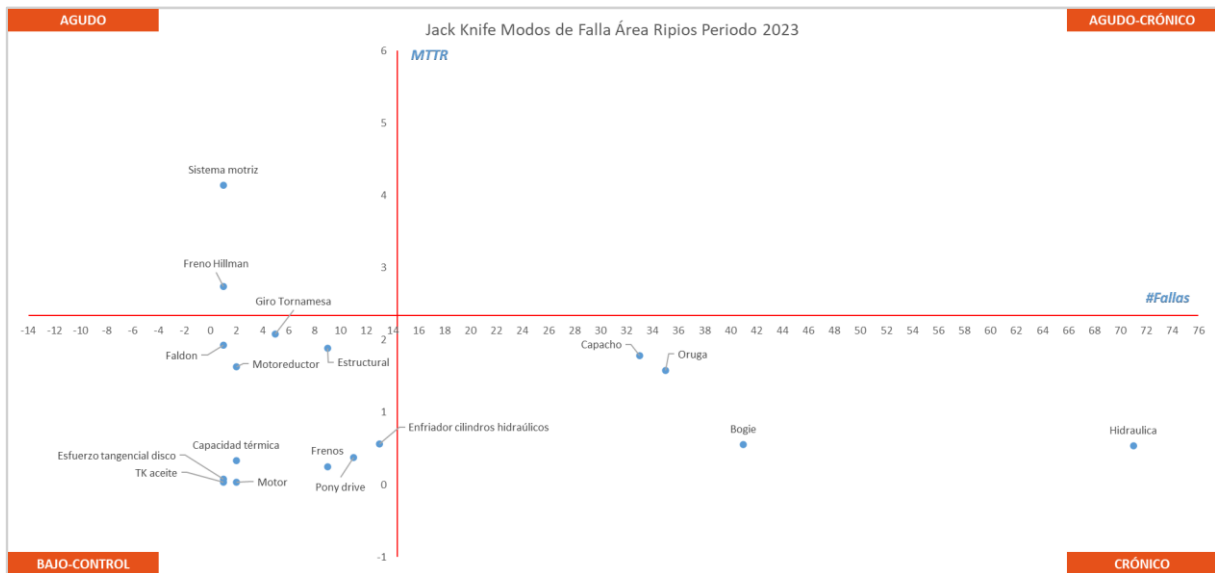
(f)

Figura 16. Diagramas de Pareto en cada equipo durante los años 2022 a 2025. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

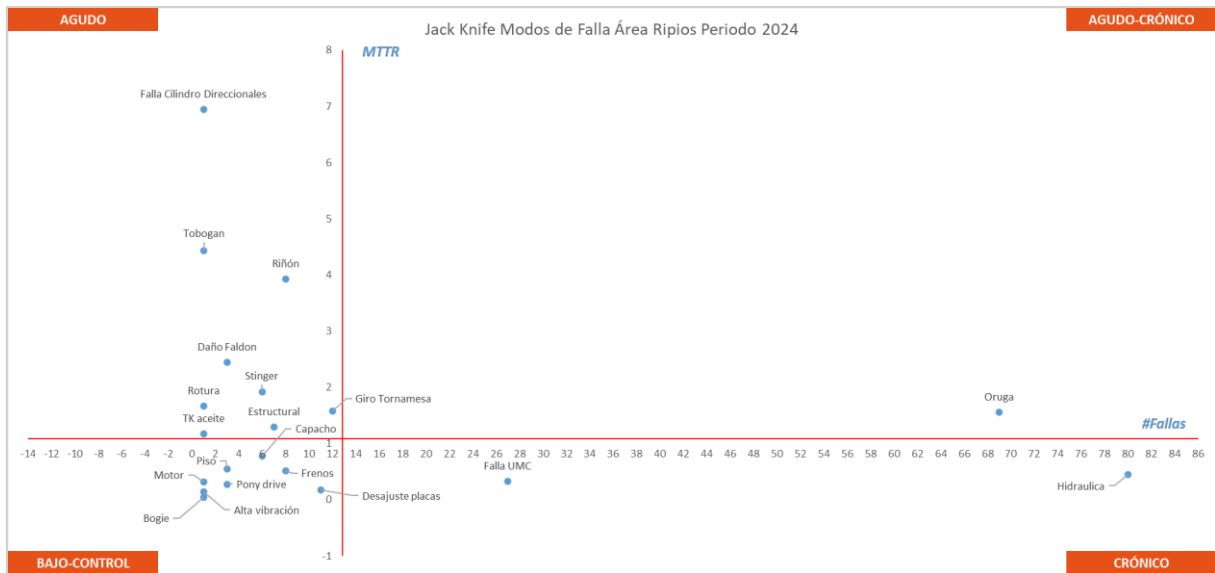
Para identificar el comportamiento de las fallas en los equipos, se es realizado un diagrama Jack Knife por modo de falla en Área Ripios tal como se presenta en la Figura 17 considerando número de fallas y Tiempo medio de reparación para los años comprendidos entre 2020 y 2025. Dividiendo cada modo en Agudo y/o crónico o Bajo Control.



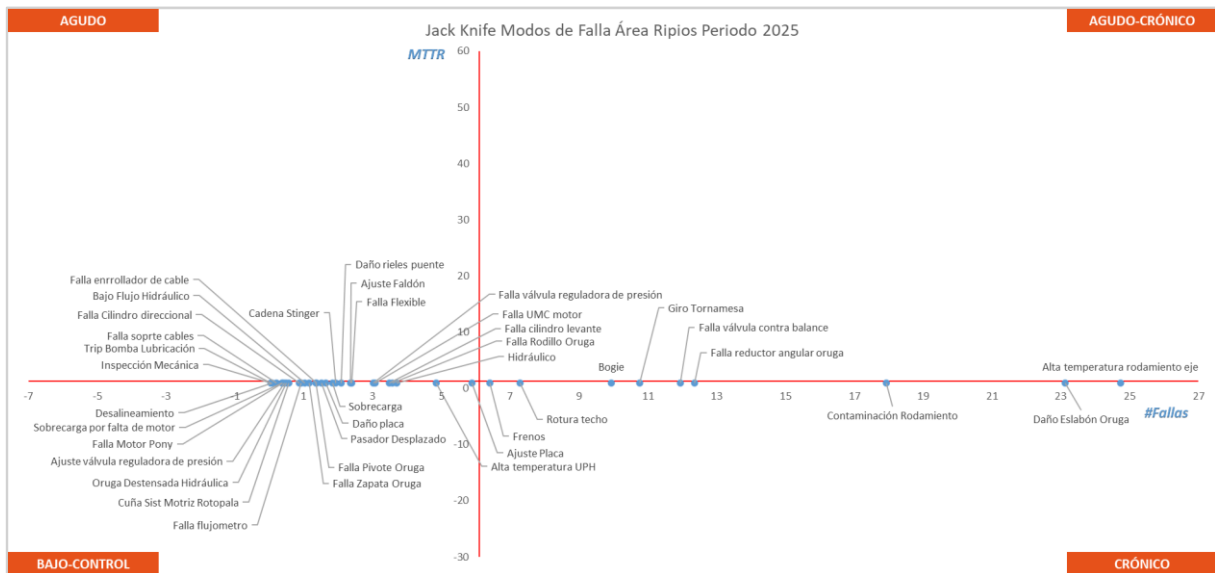
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 17. Jack Knife modo de falla Área Ripios durante los años 2022 a 2025. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

3.3 Modos de Fallas Equipos

A través de información obtenida del software SAP se es llevado a cabo el proceso de obtención y procesamiento de los modos de falla registrados (Figura 18).

Ubicación	Denominación	Txt.brv.oper.	Duración normal	Un.dur.normal	Trabajo	Unidad trabajo	Trabajo real	Prioridad	Fe.inic.extrema	Liberación real	TotalGen.(real)
PSEC-EPR-MRI-CTF	AREA 220 Carros de Transferencia	220BN001 UT EJE BOGGIE POSICION 5	1.0 H	2.0 H	2.000	Imediato	01-11-2024	01-11-2024	0.02		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-EST	Sistema Estructural	220 BN 001 AJUSTE RODILLO ENROLLACABLE	1.0 H	4.0 H	4.000	Correctivo	29-12-2024	28-12-2024	157.50		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-EST	Sistema Estructural	220 BN 001 AJUSTE Y AMARRE FALDONES	2.0 H	8.0 H	0.000	Correctivo	17-12-2024	16-12-2024	0.00		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 AMARRE Y DESAMARRE MECANICO	1.0 H	4.0 H	4.000	Correctivo	14-11-2024	13-11-2024	333.30		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 Amarre y desamarre mecanico	1.0 H	3.0 H	0.000	Correctivo	17-12-2024	16-12-2024	0.00		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 AMARRE Y DESAMARRE MECANICO	1.0 H	3.0 H	3.000	Correctivo	13-01-2025	09-01-2025	-3.25		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-EST	Sistema Estructural	220 BN 001 AMARRE Y DESAMARRE MECANICO	1.0 H	3.0 H	3.000	Correctivo	28-12-2024	27-12-2024	118.15		
PSEC-EPR-MRI-CTF-01N	AREA 220 HOOPER 001 DE RÍPIOS (NUEVO)	Cambio de rueda boggie 4	5.0 H	20.0 H	20.000	Imediato	09-01-2025	10-01-2025	3.558.36		
PSEC-EPR-MRI-CTF-01N	AREA 220 HOOPER 001 DE RÍPIOS (NUEVO)	Cambio de rueda boggie 4	5.0 H	4.0 H	20.000	Correctivo	09-01-2025	10-01-2025	3.558.36		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 Cambio dosificadores	1.0 H	2.0 H	2.000	Correctivo	21-05-2025	20-05-2025	1.249.06		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-SMO	Sistema Motriz	220 BN 001 CAMBIO MOTOR BOGUE ELEC	1.0 H	2.0 H	2.000	Correctivo	18-12-2024	17-12-2024	470.77		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-SMO	Sistema Motriz	220 BN 001 CAMBIO MOTOR BOGUE MEC	2.0 H	6.0 H	6.000	Correctivo	18-12-2024	17-12-2024	470.77		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 Desamarre mecanico hopper	1.0 H	3.0 H	3.000	Imediato	26-01-2023	26-01-2023	0.03		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	PRUEBAS FUNCIONALES EN GALPON	2.0 H	3.0 H	4.000	Correctivo	23-08-2025	21-08-2025	752.16		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-EST	Sistema Estructural	220 BN 001 Reparación Estructural	2.0 H	6.0 H	6.000	Correctivo	23-05-2024	22-05-2024	0.06		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 REPARACION ESTRUCTURAL CHUTE	4.0 H	12.0 H	0.000	Correctivo	12-02-2025	11-02-2025	0.00		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 REPONER PASADOR BOGUE #6	1.0 H	3.0 H	3.000	Correctivo	14-07-2025	13-07-2025	234.40		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 Reponer pernos boguie #6	1.0 H	3.0 H	3.000	Correctivo	12-04-2023	11-04-2023	34.68		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-EST	Sistema Estructural	220 BN 001 REPONER PERNOS VIGA VERTICAL	1.0 H	2.0 H	2.000	Correctivo	23-01-2025	22-01-2025	-2.20		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN 001 Retiro estacion impacto	1.0 H	4.0 H	4.000	Imediato	25-03-2023	25-03-2023	141.59		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001-SMO	Sistema Motriz	220 BN 01 RETIRO TAPAS BOGUES	2.0 H	2.0 H	4.000	Correctivo	23-10-2025	21-10-2025	0.04		
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	AREA 220 Hooper 001 de Rípios	220 BN001: Reparar baranda de seguridad	1.0 H	3.0 H	0.000	Imediato	23-05-2023	23-05-2023	0.00		
PSEC-EPR-MRI	AREA 220 Manejo de Rípios	220 BN001 Normalización falla enrollador	1.0 H	2.0 H	2.000	Imediato	21-05-2023	21-05-2023	149.12		
PSEC-EPR-MRI	AREA 220 Manejo de Rípios	220 RIPIOS INSPECCIÓN PLANTA	8.0 H	24.0 H	24.000	Imediato	05-11-2022	05-11-2022	290.31		
PSEC-EPR-MRI-CTF-01N	AREA 220 HOOPER 001 DE RÍPIOS (NUEVO)	220BN001 AMARRE DESAMARRE MECANICO	1.0 H	4.0 H	4.000	Correctivo	16-06-2022	15-06-2022	4.00		

(a)

Etiquetas de fila	Suma de Duración normal	Suma de Trabajo real
PSEC-EPR-MRI	13	38
AREA 220 Manejo de Rípios	13	38
220 BN001:Normalización falla enrollador	1	2
220 RIPIOS INSPECCIÓN PLANTA	8	24
220BN001: Reposición de pasador motorre	2	4
CAMBIO GRASA RUEDAS BOGGIE HOPPER 1	2	8
PSEC-EPR-MRI-CTF	1	2
AREA 220 Carros de Transferenc	1	2
200BN001 UT EJE BOGGIE POSICION 5	1	2
PSEC-EPR-MRI-CTF-001	55.5	108.5
AREA 220 Hooper 001 de Rípios	55.5	108.5
220 BN 001 AMARRE Y DESAMARRE MECANICO	3	7
220 BN 001 Cambio dosificadores	1	2
220 BN 001 Desamarre mecanico hopper	1	3
220 BN 001 REPARACION ESTRUCTURAL CHUTE	4	0
220 BN 001 REPONER PASADOR BOGUE #6	1	3
220 BN 001 Reponer pernos boguie #6	1	3
220 BN 001 Retiro estacion impacto	1	4
220 BN001: Reparar baranda de seguridad	1	0
220BN001 INSPECCION ESTRUCTURAL	1	2
220BN001 LUBRICACION CADENA E.CABLE	1	2
220BN001 Lubricar descanso ruedas boguie	2	4
220BN001: Ajuste freno	1	4
220BN001: Ajuste y/o retiro freno hillm	2	8
220BN001: Cambio de rueda N°5	2	8
220BN001: Inpección bogguies	1	0
220BN001: REV Y/O CAMBIO PIOLA STRING	1	2
AMARRE MECANICO HOPPER	1	0
AMARRE MECANICO HOPPER 001 RIPIOS	0.5	1.5
AMARRE MECANICO HOPPER 1	1	3

(b)

Equipo	Componente	Actividad
Sist Hidraulico Oruga	Freno	Abrir Freno Oruga
Disco	Rueda	Ajuste Altura
Sistema Hidraulico Pluma	Cilindro niv	Ajuste cilindro nivelación
Sistema Hidraulico Pluma	Cilindro tran	Ajuste cilindro transversal
Sistema Hidraulico Pluma	Cilindro tran	Ajuste cilindro transversal
Pony	Frenos	Ajuste Frenos
Disco	Disco	Ajuste Frenos Disco
Pony	Motriz	Ajuste Frenos Unidad Motriz
Hidraulica	Presión	Ajuste presión
Sist Hidraulico Oruga	Presión	Ajuste Presión Oruga
Rifón	Corte	Ajuste Topes Brazo Corte
Sistema Hidraulico Pluma	Cilindro niv	Ajuste/Regulación Cilindro Nivelación
Sist Hidraulico Oruga	Cilindro Dir	Alineamiento Cilindro Dir
Sist Hidraulico Oruga	Orugas	Alineamiento Orugas
Disco	Disco	Amarre Mecánico Disco
Capachos	Norback	Aplicación Norback

(c)

Figura 18. Procesamiento de datos actividades correctivas e inmediatas. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Con base en esta matriz y la validación realizada junto a ingenieros de CODELCO, se definieron los principales modos de falla para cada actividad, incorporando su respectiva matriz de criticidad según los lineamientos del libro SOMA y el enfoque FMEA. Un extracto se presenta en la Figura 19, mientras que el desarrollo completo se encuentra en el Anexo 1.

Subconjunto	Componente	Modo de Falla	Equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costos (P4)	Suma	Indicador Consecuencia	Frecuencia	Total	Criticidad
Estructural	Vigas	Abrasión o deterioro sumado a corrosión en vigas por exposición	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Orugas	Pasador	Pasador desprendido debido a montaje incorrecto	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Buzón	Cilón	Abrasión en las placas	220-BH-001	0	0	0	1	1	1	1	1	Baja
Estructural	Estructural	Abrasión seguida de corrosión	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Orugas	Zapata	Apretamiento debido a sobrecarga o uso normal	General	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Bogies	Frenos	Ajuste incorrecto sistema de frenado	220-BH-001	0	0	2	2	4	2	3	6	Media
Rueda de Capachos	Frenos	Ajuste incorrecto sistema de frenado	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Orugas	Frenos	Ajuste incorrecto sistema de frenado	General	0	0	4	1	5	2	2	4	Baja
Acéste	Filtros	Aza de Temperatura	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Rueda de Capachos	Disco	Anillo de contracción dañado o corromido	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	1	3	Baja
Rueda de Capachos	Disco	Anillo de contracción dañado por vibración o impacto	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	1	3	Baja
Orugas	Eje Cardan	Arbol de transmisión desgastado por vibración o sobreefuerzo	General	0	0	12	1	13	3	2	6	Media
Hidraulica	Mendo Final	Abusque en sistema engranado por falta de lubricación	General	0	0	4	5	9	2	2	4	Baja
Hidraulica	Enfriador	Aumento de temperatura por condiciones extremas	General	12	0	2	1	15	3	2	6	Media
Hidraulica	Enfriador	Baja eficiencia por desgaste	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Rueda de Capachos	Frenos	Balatas dañadas por uso normal	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media

Figura 19. Modos de Fallas Obtenidos a través de Actividades por ocurrencia de Falla. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Con base en los modos de falla identificados, se elaboró la matriz de actividades para la estrategia de mantenimiento (Figura 20). Esta se integró con el plan actual para su revisión y ajuste, proceso realizado junto al ingeniero de confiabilidad del Área Ripios (a). Tras el postprocesamiento, se obtuvo la matriz final propuesta para incorporar a la estrategia vigente (b). Las propuestas completas se presentan en el Anexo 2.

Nivel de Mantenimiento	Actividad Estrategia	Subconjunto	Frecuencia	Equipo	Estado	Notas
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección monitoreo MED TINTAS PENETR Pasadores Cilindro	Estructural	12S	220-ME-002	Actual	A rotopala
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección monitoreo ESTRUCTURAL spreader OPER.	Estructural	1S	220-ME-002	Actual	
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección mecánico Inspección GENERAL ESTRUCT ME002	Estructural	24S	220-ME-002	Actual	Redundante
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección monitoreo ESTRUCTURAL spreader en condición detenida.	Estructural	2S	220-ME-002	Actual	
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección mecánico PASIL-BARAND-PLUMA ME002	Estructural	3S	220-ME-002	Actual	
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección mecánico Inspección GRAL sistemaESTRUTURAL	Estructural	4S	220-ME-002	Actual	
Mantenimiento Basado en Condición	MTR Inspección ESTRUCT sistemaRODADO 220ME2	Estructural	4S	220-ME-002	Actual	
Mantenimiento Preventivo	Reparación estructural Hidraulica	Estructural	4S	220-ME-002	Propuesta	
Mantenimiento Preventivo	Mantenimiento Preventiva Estructural	Estructural	4S	220-ME-002	Propuesta	
Mantenimiento Preventivo	Inspección Carrusel ME002	Estructural	1S	220-ME-002	Propuesta	
Mantenimiento Preventivo	ASEO operativo en condición de funcionamiento RET MAT S HID 220ME002	Hidraulica	1S	220-ME-002	Actual	
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección GRAL HID/LUBR EQ en condición de funcionamiento 220ME002	Hidraulica	1S	220-ME-002	Actual	
Mantenimiento Basado en Condición	Inspección lubricación MEDICIÓN DE PRESIONES UH	Hidraulica	4S	220-ME-002	Actual	Cambio Frecuencia

(a)

Equipo	Subconjunto	Actividad Estrategia	Nivel de Mantenimiento	Frecuencia	Estado
220-BN-001	Bogie	Inspección Mecánica Rodapie	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
		Inspección Mecánica Frenos	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Medición de Temperatura Bogies Mediante Sensor de Temperatura	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Funcionando
	Lubricación e Hidráulica	Inspección Lubricación Brazo de torque	Mantenimiento Preventivo	4S	Funcionando
		Toma de Muestras Aceite	Mantenimiento Preventivo	8S	Detenido
		Inspección Caudal Flujo Lubricante Bogies	Mantenimiento Preventivo	2S	Detenido
		Limpieza Filtros Aceite Bogie	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Mantenimiento sistema Lubricación/Hidráulico	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Cambio Dispensador Lubricante Bogie	Mantenimiento Preventivo	12S	Detenido
	Hopper	Inspección Mecánica General Chute	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Inspección Mecánica Hopper	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
	Buzon	Inspección Mecánica Placas	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
		Cambio Placas	Mantenimiento Preventivo	24S	Detenido
	Estructural	Aseo operativo	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Inspección General Estructural	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
	Enrollacable	Inspección Estado de Componentes Guia Enrollacables	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Propuesta

(b)

Figura 20. Estrategia de mantenimiento realizada en base a Modos de Fallas. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

4 Discusión

El análisis realizado evidencia que la mayor concentración de fallas y horas de indisponibilidad se presenta en los equipos Rotopala, Hopper Car 1 y Spreader, los cuales representan más del 80% de los eventos registrados (Figura 14 y Figura 15). Esto confirma su condición de activos críticos y justifica el enfoque principal del estudio en estos equipos, sin excluir el análisis global del Área Ripios.

Los diagramas de Pareto (Figura 16) muestran que los modos de falla varían según el equipo, reflejando la complejidad y dinamismo del área. Sin embargo, se identifica un factor común: la variabilidad en las propiedades del material (densidad y humedad), que genera fallas específicas en componentes clave. Por ejemplo, la Rotopala presenta problemas frecuentes en su sistema de traslación debido a terrenos irregulares, mientras que el Hopper Car 1 sufre averías recurrentes en bogies por el impacto del material.

El análisis Jack Knife (Figura 17) permite priorizar los modos de falla más relevantes y persistentes en el tiempo, destacando las fallas hidráulicas como el principal problema crónico, seguidas por fallas en orugas. Estas incidencias se originan no solo por deficiencias en las estrategias de mantenimiento actuales, sino también por brechas organizacionales, como falta de control en empresas colaboradoras, gestión ineficiente de repuestos y debilidades en los protocolos de mantenimiento.

Con base en estos hallazgos, el estudio se orienta a mitigar los modos de falla críticos en los equipos mencionados, aplicando la metodología RCM para reducir la frecuencia de fallas y aumentar el MTBF. El proceso incluyó la depuración y organización de datos (Figura 18), definición de modos de falla y análisis de criticidad mediante FMEA (Figura 19), validado por ingenieros de confiabilidad. Posteriormente, se elaboró una matriz de soluciones revisada y aprobada por el área técnica (Figura 20), incorporando mejoras al plan vigente.

La implementación de la estrategia propuesta permitiría reducir en 41% las horas de falla mensuales en los equipos críticos lo cual se traduce en un incremento de la disponibilidad en 1 punto porcentual (equivalente a 7,5 horas mensuales), y aumentar la producción en aproximadamente 3%, lo que representa un impacto significativo en la continuidad operacional y el cumplimiento de metas divisionales.

5 Conclusiones

La aplicación estructurada de la metodología RCM, junto con las normativas pertinentes, permitió caracterizar con precisión las funciones, fallas funcionales y modos de falla de los equipos críticos del Área Ripios. El análisis evidenció que las fallas hidráulicas y en sistemas de traslación concentran el mayor impacto operativo, confirmando que la ausencia de una estrategia integral era un factor clave en la recurrencia de fallas.

El uso de herramientas como análisis de criticidad, Pareto y Jack Knife facilitó la priorización objetiva de subsistemas, lo que permitió elaborar una matriz FMEA robusta y definir políticas de mantenimiento que integran enfoques preventivos, correctivos racionalizados y basados en condición. Estas acciones contribuyen a optimizar recursos, aumentar el MTBF y reducir detenciones imprevistas.

Se espera que la implementación de la estrategia propuesta incremente la disponibilidad en 1 punto porcentual (equivalente a 7,5 horas mensuales) y la producción en 3%, evidenciando que las políticas basadas en confiabilidad mejoran la continuidad operacional y el cumplimiento de metas divisionales.

Adicionalmente, se refuerza la necesidad de fortalecer los procesos de control organizacional, asegurar el uso disciplinado de SAP y consolidar la retroalimentación entre Operaciones y Mantenimiento como pilares para la mejora continua. Los hallazgos también abren la posibilidad de replicar esta metodología en otros activos, contribuyendo a la estandarización del mantenimiento corporativo.

Finalmente, se identifican oportunidades para investigaciones futuras orientadas a la integración de estrategias de gestión de personal y la evaluación económica del ciclo de vida de los activos, avanzando hacia un enfoque más basado en datos y alineado con el desarrollo tecnológico del mantenimiento moderno.

Referencias

- [1] J. Aguirre Díaz *et al.*, *Libro del Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA)*. Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://www.codelco.com>
- [2] Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), *Manual de Operación de Bolsillo: Área Seca – Proyecto Minera Gaby*. Calama, Chile, 2011.
- [3] S. Eriksen, I. B. Utne, and M. Lützen, “An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 210, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ress.2021.107550.
- [4] S. Moradi-Sarvestani, M. R. Dehbozorgi, and M. Rastegar, “A three-stage reliability-centered framework for critical feeder identification, failure modes prioritization, and optimal maintenance strategy assignment in power distribution system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 230, May 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110215.
- [5] M. H. Enjavimadar and M. Rastegar, “Optimal reliability-centered maintenance strategy based on the failure modes and effect analysis in power distribution systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 203, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107647.
- [6] P. Hedayatnia, M. H. Samimi, M. Mohammadhosein, and K. Niayesh, “Ai-enhanced reliability centered maintenance for high voltage gas circuit breakers,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 170, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110919.
- [7] I. Kabashkin and V. Perekrestov, “Integrating big data and artificial intelligence in aircraft maintenance for enhanced efficiency and reliability,” in *Transportation Research Procedia*, Elsevier B.V., 2025, pp. 601–608. doi: 10.1016/j.trpro.2025.03.031.
- [8] P. Afzali, F. Keynia, and M. Rashidinejad, “A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders,” *Energy*, vol. 171, pp. 701–709, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.01.040.
- [9] International Organization for Standardization, “ISO 14224:2016 — Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment,” Sep. 2016, *Geneva, Switzerland*. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/62532.html>
- [10] “Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes,” Aug. 01, 1999, *SAE International*, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. doi: 10.4271/JA1011_199908.

Anexos

Anexo 1: Matriz Modo de Falla y Análisis de Criticidad. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Subconjunto	Componente	Modo de Falla	Equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costos (P4)	Suma	Indicador Consecuencia	Frecuencia	Total	Criticidad
Bogies	Bogie	Bogie desalineado	220-BN-001	0	0	2	1	3	1	3	3	Baja
Bogies	Bogie	Desgaste por fricción	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Bogies	Brazo de Torque	Contaminación por agentes externos	220-BN-001	0	0	2	2	4	2	2	4	Baja
Bogies	Brazo de Torque	Desgaste por fricción	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Bogies	Brazo de Torque	Exceso de carga e impacto	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Bogies	Brazo de Torque	Falta de lubricación o engrase	220-BN-001	0	0	2	2	4	2	4	8	Media
Bogies	Brazo de Torque	Fatiga estructural y fisuras	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Buzon	Cajón	Abrasión en las placas	220-BN-001	0	0	0	1	1	1	1	1	Baja
Buzon	Cajón	Corrosión en superficie	220-BN-001	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Buzon	Cajón	Desgaste por fricción	220-BN-001	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Enrollacable	Carrete	Guía inferior del cable desgastada por normalidad	220-BN-001	0	0	2	2	4	2	3	6	Media
Enrollacable	Carrete	Trabamiento de la rueda por corrosión y contaminación	220-BN-001	0	0	2	2	4	2	2	4	Baja
Bogies	Frenos	Ajuste incorrecto sistema de frenado	220-BN-001	0	0	2	2	4	2	3	6	Media
Bogies	Frenos	Fisuras en el material por sobrecarga	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Bogies	Frenos	Freno con desgaste por sobrecalentamiento o contaminación	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Buzon	Placas	Fisuras por fatiga estructural	220-BN-001	0	0	4	1	5	2	1	2	Baja
Buzon	Placas	Grietas debido a impacto sobre placas	220-BN-001	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Buzon	Placas	Parámetros agresivos de operación	220-BN-001	0	0	0	1	1	1	3	3	Baja
Buzon	Placas	Placas sueltas por impacto	220-BN-001	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Buzon	Placas	Tratamiento superficial ineficiente	220-BN-001	0	0	2	1	3	1	3	3	Baja
Bogies	Punteras (Alojamiento)	Corrosión punteras por parámetros operativos	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	4	8	Media
Bogies	Punteras (Alojamiento)	Desgaste por abrasamiento del material	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	4	8	Media
Bogies	Punteras (Alojamiento)	Filtración por sello desgastado o roto	220-BN-001	0	10	2	2	14	3	3	9	Media
Bogies	Punteras (Alojamiento)	Fisurado por impacto	220-BN-001	0	10	4	2	16	3	2	6	Media
Bogies	Rodapié	Corrosión rodapié	220-BN-001	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Bogies	Rodapié	Deformación rodapié	220-BN-001	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Bogies	Rodapié	Fijaciones en rodapié flojas	220-BN-001	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Bogies	Rueda	Daño por deformación de la rueda	220-BN-001	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Bogies	Rueda	Fisuras por fatiga estructural	220-BN-001	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Bogies	Rueda	Perfil de rueda desgastado	220-BN-001	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Lubricación	Sistema	Lubricación insuficiente	220-BN-001	0	0	2	1	3	1	4	4	Baja
Tornamesa	Acoplamiento	Desalineación conjunto	220-ME-002	0	0	4	2	6	2	1	2	Baja
Tornamesa	Acoplamiento	Desgaste por fricción	220-ME-002	0	0	4	2	6	2	1	2	Baja
Estructural	Baranda Carusel Spreader	Revisión Bloqueo	220-ME-002	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Estructural	Baranda Carusel Spreader	Revisión borde seguro barandas	220-ME-002	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidraulica	Cilindro Levante	Carrete de la válvula contaminado	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	0	0	Baja
Hidraulica	Cilindro Levante	Corrosión en superficie de contacto	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Levante	Desalineación válvula proporcional	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	0	0	Baja
Hidraulica	Cilindro Levante	Desgaste del material por tiempo	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Levante	Desgaste por abrasión	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Levante	Desgaste por fricción	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Levante	Fisura por fatiga en oreja de apoyo	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Levante	Fuga interna al auxiliar	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Levante	Línea obstruida	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Levante	Válvula defectuosa	220-ME-002	0	10	4	5	19	3	3	9	Media
Hidraulica	Cilindro Pluma	Carrera del cilindro alterada por falla interna	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Pluma	Cilindros desincronizados	220-ME-002	0	0	2	5	7	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Pluma	Daño camisa cilindro	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Pluma	Desgaste del material por tiempo	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Pluma	Desgaste por abrasión	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Pluma	Desgaste por fricción	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Pluma	Falla en casquillos	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Pluma	Sello desgastado	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Pluma	Vastago deteriorado por abrasión	220-ME-002	0	0	4	5	9	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Pluma (Spreader)	Sello embolo presión de una cámara a otra	220-ME-002	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Tornamesa	Piñon Corona	Daño en los dientes de piñon por sobre esfuerzo	220-ME-002	0	0	8	8	16	3	1	3	Baja
Tornamesa	Piñon Corona	Desgaste por fricción	220-ME-002	0	0	8	8	16	3	1	3	Baja
Tornamesa	Piñon Corona	Grietas por impacto	220-ME-002	0	0	8	8	16	3	1	3	Baja
Rueda de Capachos	Capachos	Capacho fisurado por desgaste, impacto o vibración	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Capachos	Chaveta de capacho suelta o rota por sobrecarga	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Capachos	Corrosión en capachos debido a material abrasivo	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Capachos	Mala instalación en resador	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Capachos	Montaje incorrecto en puntas	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Capachos	Pasador desplazado por vibración excesiva	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Capachos	Pérdida de espesor de revestimiento cono	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Capachos	Puntas de Capachos desgastadas o quebradas	220-RC-001	0	0	4	5	9	2	4	8	Media
Rueda de Capachos	Cono	Falla de revestimiento en cono	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	3	9	Media
Rueda de Capachos	Cono	Fisuras y Grietas debido a Desgaste como	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	2	4	Baja
Rueda de Capachos	Cono	Placas de cono desgastadas por abrasamiento con material	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	3	9	Media
Rueda de Capachos	Cono	Placas sueltas por impacto	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	3	9	Media
Rueda de Capachos	Cono	Sello deteriorado cono	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	2	6	Media
Rueda de Capachos	Disco	Anillo de contracción dañado o corrido	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	1	3	Baja
Rueda de Capachos	Disco	Anillo de contracción fisurado por vibración o impacto	220-RC-001	0	0	8	2	10	3	1	3	Baja
Rueda de Capachos	Disco	Desalineamiento eje baja	220-RC-001	0	0	12	8	20	4	2	8	Media
Rueda de Capachos	Disco	Eje roto por exceso de carga o impacto	220-RC-001	0	0	12	8	20	4	1	4	Baja
Rueda de Capachos	Disco	Rodamiento dañado o desalineado	220-RC-001	0	0	12	2	14	3	1	3	Baja
Rueda de Capachos	Flujo Reductor	Fluido obstruido o contaminado	220-RC-001	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Rueda de Capachos	Frenos	Ajuste incorrecto sistema de frenado	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Rueda de Capachos	Frenos	Balatas dañadas por uso normal	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Rueda de Capachos	Frenos	Cristalización de las balatas por sobrecalentamiento prolongado	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Rueda de Capachos	Frenos	Fisuras en el material por sobrecarga	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Rueda de Capachos	Frenos	Freno con desgaste por sobrecalentamiento o contaminación	220-RC-001	12	0	4	2	18	3	3	9	Media
Hidraulica	Mando Final RC	Filtración	220-RC-001	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidraulica	Mando Final RC	Mala Conexión	220-RC-001	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidraulica	Mando Final RC	Pérdida de Presión	220-RC-001	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidraulica	Mando Final RC	Sobre Esfuerzo	220-RC-001	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Rueda de Capachos	Rifón	Desgaste del material por abrasión	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Rueda de Capachos	Rifón	Rifón fisurado por corrosión	220-RC-001	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Hidraulica	Bombas	Bomba con obstrucción de material	General	0	0	2	2	4	2	4	8	Media
Hidraulica	Bombas	Desgaste normal de la bomba	General	0	0	2	2	4	2	3	6	Media
Hidraulica	Bombas	Fuga por sello deteriorado	General	0	10	2	2	14	3	3	9	Media
Hidraulica	Bombas	Instalación deficiente del equipo	General	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Hidraulica	Bombas	Pérdida de eficiencia	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidraulica	Bombas	Pruebas de eficiencia en bombas	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidraulica	Bombas	Sobrecalentamiento bomba hidraulica	General	12	0	2	2	16	3	3	9	Media
Orugas	Cadena	Cadena atascada por atrapamiento de material en el sistema	General	0	0	4	2	6	2	4	8	Media
Orugas	Cadena	Desalineación del sistema de cadenas por mal ajuste de tensión	General	0	0	4	2	6	2	4	8	Media
Hidraulica	Cilindro Direccional	Basitidor cilindro deformado	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Direccional	Contaminación Fluido Hidráulico	General	0	0	2	2	4	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Direccional	Contaminación Fluido Hidráulico	General	0	0	2	2	4	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Direccional	Deformación estructura articulada cilindro	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Direccional	Desgaste estructura articulada cilindro	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Direccional	Oreja Cilindro Dañada por sobrecargas o Corrosión	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Direccional	Oreja Cilindro Dañada por sobrecargas o Corrosión	General	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Direccional	Sellos internos Dañados	General	0	10	2	2	14	3	3	9	Media
Hidraulica	Cilindro Direccional	Tubo deformado por carga excesiva	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Hidraulica	Cilindro Direccional	Vanilla de piston dañada o corrida	General	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Hidraulica	Cilindro Direccional B Y C	Sellos internos Dañados	General	0	10	2	2	14	3	2	6	Media

Anexo 1: (Continuación)

Hidráulica	Cilindro Tensado	Cilindro tensor con dificultades de tensado	General	0	0	2	2	4	2	4	8	Media
Hidráulica	Cilindro Tensado	Cilindro tensor con dificultades de tensado	General	0	0	2	1	3	1	3	3	Baja
Hidráulica	Cilindro Tensado	Vibración Excesiva en cilindros provocando daño	General	0	0	4	2	6	2	4	8	Media
Hidráulica	Cilindro Tensado	Vibración Excesiva en cilindros provocando daño	General	0	0	4	1	5	2	2	4	Baja
Hidráulica	Cilindro Tensor	Cámara de nitrógeno absorbe sobrepresión (falla)	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Cilindro Tensor	Pérdida de Presión Acumulador de Nitrógeno	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Cilindro Tensor	Sellos internos cámaras	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Cilindro Tensor	Sobrepresión	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Desconexión/Conexión Hidráulica Oruga	Conexión mal establecida	General	0	10	2	2	14	3	2	6	Media
Orugas	Eje Cardán	Árbol de transmisión desgastado por vibración o sobreesfuerzo	General	0	0	12	1	13	3	2	6	Media
Orugas	Eje Cardán	Cardán dañado o deteriorado por impacto o contaminación	General	0	0	12	1	13	3	2	6	Media
Orugas	Eje Cardán	Cruceta rota por impacto	General	0	0	12	1	13	3	2	6	Media
Hidráulica	Enfriador	Aumento de temperatura por condiciones extremas	General	12	0	2	1	15	3	2	6	Media
Hidráulica	Enfriador	Baja eficiencia por desgaste	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Enfriador	Enfriador con desgaste por uso normal	General	0	0	4	1	5	2	2	4	Baja
Hidráulica	Enfriador	Enfriador contaminado	General	0	0	2	1	3	1	2	2	Baja
Hidráulica	Enfriador	Filtración por desgaste	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Estructural	Escaleras	Estructura de escalera corroída por exposición	General	30	0	2	1	15	3	3	9	Media
Estructural	Escaleras	Flisurado en estructura escalera por cargas constantes	General	30	0	2	1	15	3	3	9	Media
Orugas	Eslabon	Eslabon dañado por efectos del terreno y parámetros operativos	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Orugas	Eslabon	Eslabon desgastado o dañado por sobrecargas	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Orugas	Eslabon	Estramiento Eslabones por parámetros operativos	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Orugas	Eslabon	Pérdida de tensión por elongación inicial de eslabon nuevo	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Estructural	Estructural	Abrasión seguido de corrosión	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Acetile	Filtros	Alta de Temperatura	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Acetile	Filtros	Caida por alza de temperatura	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Acetile	Filtros	Filtros dañados o desgastados normalidad	General	0	10	2	1	13	3	3	9	Media
Acetile	Filtros	Saturación material contaminado	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Acetile	Filtros	Saturación por material contaminado	General	0	0	2	1	3	1	3	3	Baja
Orugas	Flanjos	Pendiente porque es pernera	General	0	0	4	1	5	2	2	4	Baja
Hidráulica	Flexible	Desgaste normal	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Flexible	Desgaste por roce externo	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Flexible	Sobrepresión	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Flexibles	Degrade interno de flexible por fluido incompatible	General	0	0	2	2	4	2	3	6	Media
Hidráulica	Flexibles	Desgastamiento de flexible por mal conestonado	General	0	10	2	2	14	3	2	6	Media
Hidráulica	Flexibles	Flexible agrietado por dobles inesperado	General	0	10	2	2	14	3	3	9	Media
Hidráulica	Flexibles	Flexible expuesto a abrasión	General	0	10	2	2	14	3	3	9	Media
Orugas	Frenos	Ajuste incorrecto sistema de frenado	General	0	0	4	1	5	2	2	4	Baja
Orugas	Frenos	Balatas dañadas por uso normal	General	0	0	4	1	5	2	2	4	Baja
Orugas	Frenos	Cristalización de las balatas por sobrecalentamiento prolongado	General	12	0	4	1	17	3	2	6	Media
Orugas	Frenos	Fisuras en el material por sobrecarga	General	0	0	4	5	9	2	2	4	Baja
Orugas	Frenos	Freno con desgaste por sobrecalentamiento o contaminación	General	12	0	4	1	17	3	2	6	Media
Estructural	Gearing	Desgaste por corrosión	General	0	0	2	1	3	1	2	2	Baja
Estructural	Gearing	Falta de limpieza constante	General	0	0	2	1	3	1	2	2	Baja
Estructural	Guardapie	Revisión Guardapie en estado	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Lineas	Daño por impacto en líneas	General	0	0	4	1	5	2	1	2	Baja
Hidráulica	Lineas	Fuga línea alimentación motor hidráulico	General	0	10	2	1	13	3	1	3	Baja
Hidráulica	Lineas	Fuga por fisura en línea	General	0	10	4	1	15	3	1	3	Baja
Hidráulica	Lineas	Vibración o Choque constante línea	General	0	10	2	1	13	3	1	3	Baja
Acetile	Lubricación	Falta de lubricante en componentes	General	0	0	2	1	3	1	5	5	Media
Acetile	Lubricación	Filtración por conexiones dañadas/Obstrucción Fluido	General	0	0	2	1	3	1	5	5	Media
Acetile	Lubricación	Lubricante contaminado	General	0	10	2	1	13	3	5	15	Alta
Hidráulica	Mando Final	Ataque en sistema engranado por falta de lubricación	General	0	0	4	5	9	2	2	4	Baja
Hidráulica	Mando Final	Filtración en mando final debido a sello desgastado o roto	General	0	0	4	5	19	3	2	6	Media
Hidráulica	Mando Final	Mando final sobrecalentado por falla térmica	General	12	0	4	5	21	4	2	6	Media
Hidráulica	Microfiltrador	Filtración por instalación deficiente	General	0	10	2	1	13	3	2	6	Media
Hidráulica	Microfiltrador	Filtro saturado por obstrucción por material	General	0	10	2	2	14	3	2	6	Media
Hidráulica	Microfiltrador	Flisurado por sobrepresión	General	0	10	2	1	13	3	2	6	Media
Hidráulica	Microfiltrador	Sellos del equipo dañados o desgastados	General	0	10	4	1	15	3	2	6	Media
Orugas	Pasador	Pasador desprendido debido a montaje incorrecto	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Orugas	Pasador	Pasador contaminación o con falta de Lubricante	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Orugas	Pasador	Pasador dañado por sobrecargas o vibración excesiva	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Orugas	Pasador	Pasador deteriorado por corrosión	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Orugas	Pasador	Pasador Flisurado por impacto	General	0	0	4	1	5	2	4	8	Media
Estructural	Pernera	Grieta en pernos por fatiga	General	0	0	2	1	3	1	4	4	Baja
Estructural	Pernera	Pernos corroídos por exposición al ambiente	General	0	0	2	1	3	1	4	4	Baja
Estructural	Pernera	Pernos faltantes en equipos	General	0	0	2	1	3	1	4	4	Baja
Estructural	Pernera	Pernos sueltos en equipos	General	0	0	2	1	3	1	4	4	Baja
Estructural	Pernera	Vibración excesiva en pernos generando afloje	General	0	0	2	1	3	1	4	4	Baja
Estructural	Pernos	Deformación y estramiento	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Estructural	Pernos	Sizalle	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Estructural	Puertas	Estructura de puerta corroída por exposición	General	0	0	2	1	3	1	2	2	Baja
Estructural	Puertas	Flisurado en estructura puerta por cargas constantes	General	0	0	2	1	3	1	2	2	Baja
Orugas	Rodillo	Desgaste en rodillos debido a contaminación o falta de lubricación	General	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Orugas	Rodillo	Rodillo deformado debido a cargas irregulares	General	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Orugas	Rodillo	Rodillo trancado debido a oxidación o contaminación en el eje	General	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Orugas	Rodillo	Ruido anormal en rodillos debido a aprietamiento o falta de lubricación	General	0	0	4	2	6	2	3	6	Media
Orugas	Sprocket	Dientes de sprocket dañados	General	0	0	12	2	14	3	2	6	Media
Orugas	Sprocket	Sprocket desgastado por sobreesfuerzo o mal alineamiento con cadena	General	0	0	12	2	14	3	2	6	Media
Orugas	Sprocket	Sprocket Flisurado por sobrecarga de oruga	General	0	0	12	2	14	3	2	6	Media
Acetile	Tanque	Filtración desgaste común	General	12	0	4	1	27	4	2	6	Media
Acetile	Tanque	Filtración por falta de sellos	General	0	10	2	1	13	3	2	6	Media
Acetile	Tanque	Filtración por falta de apriete	General	0	10	4	1	15	3	2	6	Media
Hidráulica	Valvulas	Contaminación interna del sistema	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Valvulas	Desgaste sellos internos valvula	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Valvulas	Señal de activación errática o nula	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Valvulas	Sobrepresión	General	0	0	2	1	3	1	1	1	Baja
Hidráulica	Valvulas	Obstrucción por material ajeno en valvula	General	0	0	2	1	3	1	2	2	Baja
Hidráulica	Vavulas	Sellos deteriorados valvula	General	0	10	2	1	13	3	2	6	Media
Hidráulica	Vavulas	Sobrepresión circuito	General	0	0	2	1	3	1	2	2	Baja
Estructural	Vigas	Abrasión o deterioro sumado a corrosión en vigas por exposición	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Estructural	Vigas	Fatiga estructural por ciclos de carga repetidos	General	0	0	4	2	6	2	2	4	Baja
Orugas	Zapata	Aprietamiento debido a sobrecarga o uso normal	General	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Orugas	Zapata	Daño provocado por parámetros operativos variables	General	0	0	4	1	5	2	3	6	Media
Orugas	Zapata	Desgaste del Material por abrasividad y corrosión	General	0	0	4	1	5	2	3	6	Media

Anexo 2: Matriz Actividad Estrategia. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por CODELCO).

Equipo	Subconjunto	Actividad Estrategia	Nivel de Mantenimiento	Frecuencia	Estado
220-BN-001	Bogie	Inspección Mecánica Rodapie	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
		Inspección Mecánica Frenos	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Medición de Temperatura Bogies Mediante Sensor de Temperatura	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Funcionando
	Lubricación e Hidraulica	Inspección Lubricación Brazo de torque	Mantenimiento Preventivo	4S	Funcionando
		Toma de Muestras Aceite	Mantenimiento Preventivo	8S	Detenido
		Inspección Caudal Flujo Lubricante Bogies	Mantenimiento Preventivo	2S	Detenido
		Limpieza Filtros Aceite Bogie	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Mantenimiento sistema Lubricación/Hidráulico	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Cambio Dispensador Lubricante Bogie	Mantenimiento Preventivo	12S	Detenido
	Hopper	Inspección Mecánica General Chute	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Inspección Mecánica Hopper	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
	Buzon	Inspección Mecánica Placas	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
		Cambio Placas	Mantenimiento Preventivo	24S	Detenido
	Estructural	Aseo operativo	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Inspección General Estructural	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
	Enrollacable	Inspección Estado de Componentes Guia Enrollacables	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Propuesta
220-ME-002	Lubricación e Hidraulica	Inspección Medición de Presiones UH	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Funcionando
		Pruebas Eficiencia Bomba	Mantenimiento Preventivo	12S	Funcionando
		Limpieza Unidad Enfriamiento	Mantenimiento Preventivo	2S	Funcionando
		Inspección Caudal Flujo Hidraulico	Mantenimiento Preventivo	2S	Detenido
		Mantenimiento Sistema Microfiltrado	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Inspección Mecánica Soporte Cilindros Hidraulicos	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
		Inspección Mecánica Componentes Cilindro Pluma	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Funcionando
		Inspección Mecánica Diferencia Presiones Cilindro Pluma	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Funcionando
		Aseo en Condición Detenida Cilindro Pluma	Mantenimiento Preventivo	1S	Detenido
		Inspección Valvulas Funcionales Spreader	Mantenimiento Preventivo	12S	Detenido
		Inspección Poleas Rodillos y Patines, Revisar Tuberías Rígidas y Flexibles	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
		Toma de Muestras Aceite	Mantenimiento Preventivo	8S	Detenido
		Inspección Caudal Flujo Lubricante	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Funcionando
		Limpieza Filtros Aceite Hidraulico	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Inspección Sistema Lubricación/Hidraulica	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Inspección Flexibles	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
	Spreader	Reparación Fisuras en Componentes Spreader	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Limpieza Componentes General	Mantenimiento Preventivo	1S	Ambas

Anexo 2: (Continuación)

220-ME-002	Orugas	Inspección de Temperatura Mando Final Mediante Sensores	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Medición de Temperatura Rodillos Mediante Sensores	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Medición de Tensión Cadena Mediante Sensores	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Medición de Espesor Rodillos	Mantenimiento Preventivo	8S	Detenido
		Mantenimiento Mecánico Ejes Direccionales Sistema Traslación	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Medición Desgaste Sistema Traslación	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Ultrasonido Pasador Cadena Oruga Spreader	Mantenimiento Basado en Condición	8S	Funcionando
		Monitoreo Sistema Traslación Oruga Spreader	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
	Estructural	Medición Tintas Penetrantes Pasadores Cilindro	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Funcionando
		Monitoreo Vigas Soporte Contrapeso Spreader	Mantenimiento Basado en Condición	24S	Funcionando
		Reparación Estructural Hidraulica	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Mantenimiento Preventiva Estructural	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Inspección Carrusel	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
	Pernería	Reapriete Pernos Spreader	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Reposición Pernos Spreader	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
	Tornamesa	Medición Desgaste Piñón Corona	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
		Medición Espesor Frenos	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
220-RC-001	Lubricación e Hidraulica	Monitoreo Eficiencia Bomba UH	Mantenimiento Basado en Condición	12s	Funcionando
		Inspección de Presión Cilindros Levante	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Inspección de Temperatura Sistema Hidraulico	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Inspección General Hidraulica/Lubricación Equipos	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Medición de Presiones UH	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Funcionando
		Inspección Mecánica Componentes Cilindro Direccional	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Ambas
		Inspección Flexibles Rotopala	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Inspección Seguro Sobrecarga Cilindros	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
		Inspección Valvulas Funcionales Rotopala	Mantenimiento Basado en Condición	48S	Funcionando
		Mantenimiento Sistema Microfiltrado Rueda	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Pruebas Eficiencia Bomba	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
		Limpieza Sistema Hidraulico	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Limpieza Unidad Enfriamiento	Mantenimiento Preventivo	2S	Detenido
		Aseo Retiro Material Sistema Hidraulico	Mantenimiento Preventivo	1S	Funcionando
		Toma de Muestras Aceite	Mantenimiento Basado en Condición	8S	Detenido
		Inspección Caudal Flujo Hidraulico Condición Detenida	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
		Inspección Caudal Flujo Lubricante Condición Detenida	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
		Limpieza Filtros Aceite	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Mantenimiento Inspección flujo lubricante rodamiento eje	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Inspección Mecánica Obstrucción Filtros	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido

Anexo 2: (Continuación)

220-RC-001	Orugas	Inspección de Temperatura Mando Final	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Funcionando
		Medición de Temperatura Rodillos	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Funcionando
		Medición de Tensión Cadena	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Funcionando
		Medición de Espesor Rodillos	Mantenimiento Basado en Condición	8S	Funcionando
		Chequear Eje Cadena	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Detenido
		Inspección fugas en poleas y rodillos portantes, además de elementos hidráulicos	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Inspección poleas rodillos y patines, revisar tuberías rígidas y flexibles	Mantenimiento Basado en Condición	48S	Detenido
		Lubricación Conjunto Eje Cardan/Mando Final	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
	Estructural	Inspección Estructural	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Ambas
		Aseo Operativo	Mantenimiento Preventivo	1S	Funcionando
		Reparación Estructural Hidráulica	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Inspección Mecánica Escaleras, Barandas, Pluma	Mantenimiento Preventivo	2S	Detenido
		Inspección Pintura	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
		Inspección Cavidades Pintura	Mantenimiento Basado en Condición	48S	Detenido
		Medición Tintas Penetrantes Pasadores Cilindro	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
	Rueda	Mantenimiento Mecánico Aplicación Norback	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Mantenimiento Mecánico Cambio Placas Cono	Mantenimiento Basado en Condición	8S	Detenido
		Mantenimiento Mecánico Prueba Funcionamiento Frenos	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Detenido
		Chequeo Sello Protección Descansos Rueda Excavadora	Mantenimiento Basado en Condición	1S	Detenido
		Chequeo Uniones Roscadas Zuncho-Unidad Motriz Rueda	Mantenimiento Basado en Condición	12S	Detenido
	Pernería	Apriete pernos Componentes Rotopala	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
		Inspección Mecánica Reapriete Pernos Rotopala	Mantenimiento Basado en Condición	4S	Detenido
		Inspección Mecánica Reposición Pernos Rotopala	Mantenimiento Preventivo	4S	Detenido
	Riñón	Inspección Mecánica Placas Riñón Inferior y Superior	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
		Mantenimiento Mecánico Cambio Riñón	Mantenimiento Basado en Condición	24S	Detenido
		Inspección Mecánica Gap Riñón-Cono Detenido	Mantenimiento Basado en Condición	2S	Detenido
		Inspección Mecánica Cojinetes Fricción	Mantenimiento Basado en Condición	48S	Detenido