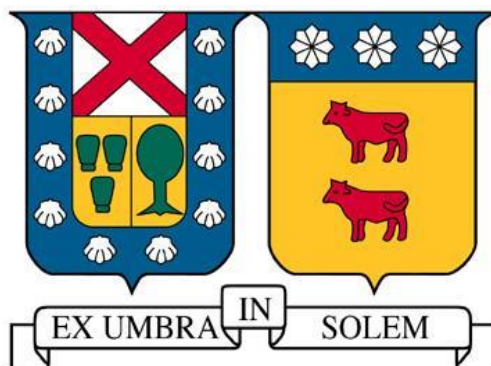


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



PROPUESTA DE MEJORAMIENTO POLÍTICA DE
MANTENIMIENTO PARA MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS,
MINERA CENTINELA.

RODRIGO CRUZ PIZARRO

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

PROFESOR GUÍA

: SR. FREDY KRISTJANPOLLER

JUNIO 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: PROPUESTA DE MEJORAMIENTO POLÍTICA DE MANTENIMIENTO PARA MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS, MINERA CENTINELA

Nombre del candidato(a): Rodrigo Cruz Pizarro

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Fredy Kristjanpoller Rodríguez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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


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

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

Presenta información que corresponde al actual modelo operativo de mantenimiento de Antofagasta Minerals, tanto en cantidad de recursos como en la orientación de los mismos.

4.- FIRMAS

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

Fecha: 20/06/2005; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/06/25

; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Índice

1. Resumen	4
2. Introducción	5
3. Objetivo General y Alcance	6
4. Proceso Productivo de Obtención de Cátodos.	7
4.1 Descripción General del Proceso	7
4.2 Sistema de Cosecha de Cátodos Minera Centinela	9
4.2.1 Celdas de Electro obtención	9
4.2.2 Puentes de Cosecha	10
4.2.3 Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos	11
4.2.4 Características Generales y Partes de la MLDC	11
5. Marco Teórico	14
5.1 Definiciones de Confiabilidad	14
5.1.1 Función densidad de probabilidad de fallas $f(t)$.	14
5.1.2 Probabilidad Acumulada de Fallas $F(t)$	15
5.1.4 MTBF	16
5.1.5 MTTR	16
5.1.6 Disponibilidad:	17
5. Metodología, Obtención y Análisis de Datos.	17
6.1 Análisis de Datos	19
6.2 Política Actual Ventajas y Desventajas Operacionales	20
6.3. Datos Obtenidos Periodo Enero – Julio 2022	21
6.4 Indicadores de Desempeño, Grafico de dispersión y Análisis de modos de falla principales Primer Semestre 2022.	25
7. Propuesta Mejoramiento a la Política de Mantenimiento	28
7.1 Análisis	28

7.2	Propuesta de Mejoramiento	29
7.3	Datos Obtenidos Periodo Julio - diciembre 2022	31
7.4	Indicadores de Desempeño, Grafico de dispersión y Análisis de modos de falla principales Segundo Semestre 2022.	33
8.	Análisis Comparado Ambos Periodos	35
9.	Propuesta Mejoramiento Política de Mantenimiento	36
10.	Conclusiones	41
11.	Referencias	43

1. Resumen

La Tesina presentada a continuación muestra, en base a los datos de detenciones por Mantenimiento programado (MP) y mantenimiento no programado (MNP), los resultados de la implementación de un Mejoramiento a la política de mantenimiento para la Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos (MLDC) de Centinela, equipo único y sin redundancia, teniendo como condición de borde que las horas de PM semanales asignadas por la gerencia son de 12 horas y como dato que la tasa de falla aumenta en la medida que se avanza en los días sin PM (disminución de la Confiabilidad). En este mejoramiento a la política de mantenimiento se buscó mejorar y volver los indicadores KPI de la máquina a los valores meta establecidos por la gerencia de mantenimiento, ya que durante el primer semestre del año estos indicadores estuvieron bajo los valores meta. Se buscó minimizar los mantenimientos correctivos y disminuir la necesidad de recurso no programado, sobre todo durante los fines de semana en donde se dispone de menos recursos para intervenciones (dotación de mantenedores).

Para lo anterior se realizaron análisis de confiabilidad al equipo Máquina despegadora, que consideraron modos de falla y gráficas de dispersión, con el fin de visualizar cuales son los componentes (sistemas) de la máquina que generan mayor indisponibilidad y cuáles son los modos de falla asociados a esas indisponibilidades. Lo anterior mediante el apoyo del Software de Gestión de Activos RMES, herramienta de análisis disponible en Centinela y manejo de gráficas en Excel.

Finalmente se muestran los resultados de este mejoramiento a la política y como ella incidió de manera positiva en los KPIs MTBF y disponibilidad, aumentando desde un valor de 14,2 [h] a un valor de 19,8 [h] y 83,1% y un 89,8% respectivamente, aunque manteniendo los modos de falla crónicos. También se hace una propuesta de política de mantenimiento que considera recomendaciones respecto de las otras variables que deben ser abordadas en el proceso del mantenimiento, con el fin de evolucionar desde un mantenimiento preventivo a un mantenimiento productivo, en donde se apunte de manera constante a la implementación de mejoras al proceso como a los elementos utilizados en el mantenimiento del activo.

2. Introducción

En una industria (Producción de Cobre) en donde las Plantas de Hidrometalurgia se enfrentan, muchas de ellas, a la segunda mitad de su vida operativa, se hace fundamental gestionar y generar políticas las cuales permitan mantener costos de producción bajos, y mínimos MTBF, sobre todo en sus equipos críticos.

En general, en el proceso de extracción de cobre, una planta de Hidrometalurgia es similar a una planta concentradora hasta el proceso de aglomerado: tiene etapas similares en el Chancado, y un proceso en donde el mineral es tratado para permitir una transformación química para la extracción de cobre, la aglomeración.

De ahí en adelante es un proceso electroquímico complejo, en donde numerosas variables deben estar en control para obtener un producto final (cátodos de cobre), el cual cuenta con la calidad que permita un pago máximo a la compañía desde el cliente final.

El equipo que es el paso final para la obtención del cátodo de cobre es la MLDC, Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos. Este activo, como bien lo indica su nombre, tiene como función el lavado y despegue de manera sistemática de las lingadas de cobre que salen de las celdas de electro obtención. En el caso de Minera Centinela este equipo no tiene redundancia, esto tiene una implicancia fundamental para el proceso productivo: cuando el equipo está en falla, la producción se detiene, esto hace que de acuerdo con la definición de criticidad [1], en donde una de las variables es el efecto de la falla de un equipo/componente sobre el sistema, el activo máquina despegadora tiene una criticidad alta.

Lo anterior hace que la política de mantenimiento de este activo tenga un impacto directo en el negocio: todas las horas en las cuales la Máquina no opera (Down time), son costo de ineficiencia. Considerando que con un precio promedio al 2022 [2] de 3,99 [USD/Lb] y una producción promedio de 300 [ton/día], una hora de Down time son aproximadamente 120 [KUSD] de costo. En general los demás costos, entendidos como costos variables [3], son mucho menores a los costos asociados a una hora de indisponibilidad, por lo que el costo de ineficiencia tiende al ingreso que se deja de facturar por cada detención.

3. Objetivo General y Alcance

A través de un análisis de confiabilidad para la Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos de Minera Centinela (en adelante la Máquina o MLDC), la cual es el equipo final del sistema de cosecha de la nave de Electro obtención (EW) se pretende lo siguiente:

- Establecer los modos de falla más comunes de la Máquina despegadora de cátodos.
- Analizar como impacta en los KPI el cambio de distribución de las horas de PM semanales del activo. Este mejoramiento generado como acción de corto plazo para recuperar los valores de cumplimiento de los indicadores de mantenimiento de la MLDC.
- Proponer acciones que permitan accionar sobre los modos de falla crónicos.
- Considerando los resultados del punto anterior, proponer de manera heurística un mejoramiento a la política de mantenimiento que permita aumentar la confiabilidad y mejorar los indicadores de desempeño, KPI's, del activo Máquina despegadora de cátodos.
- Proponer acciones tanto a nivel de equipos de trabajo como del activo que permitan sistematizar el mantenimiento a través de la mejora continua y la actualización de las políticas existentes.

Todo lo anterior para lograr una gestión del activo basado en los principios de mantenimiento de clase mundial, como es el uso de las herramientas de análisis de confiabilidad y la mejora continua de los procesos, tanto a nivel de planificación, confiabilidad y ejecución de mantenimiento. Esta propuesta de mejoramiento debe estar encuadrada en los planes de negocio de la compañía y en concordancia con las definiciones de gestión de activos de Minera Centinela.

4. Proceso Productivo de Obtención de Cátodos.

4.1 Descripción General del Proceso

El proceso productivo de producción de Cobre en las plantas de hidrometalurgia se compone en general de las siguientes etapas las cuales son sucesivas entre ellas:

- Extracción desde Mina.
- Chancado, Aglomerado y Apilamiento.
- Lixiviación.
- Extracción por Solventes, SX.
- Electro obtención EW.

La imagen a continuación [4] es una buena indicación del flujo de mineral a través del proceso. En general todas las plantas de Hidrometalurgia siguen el mismo orden, con cambios más bien mínimos:

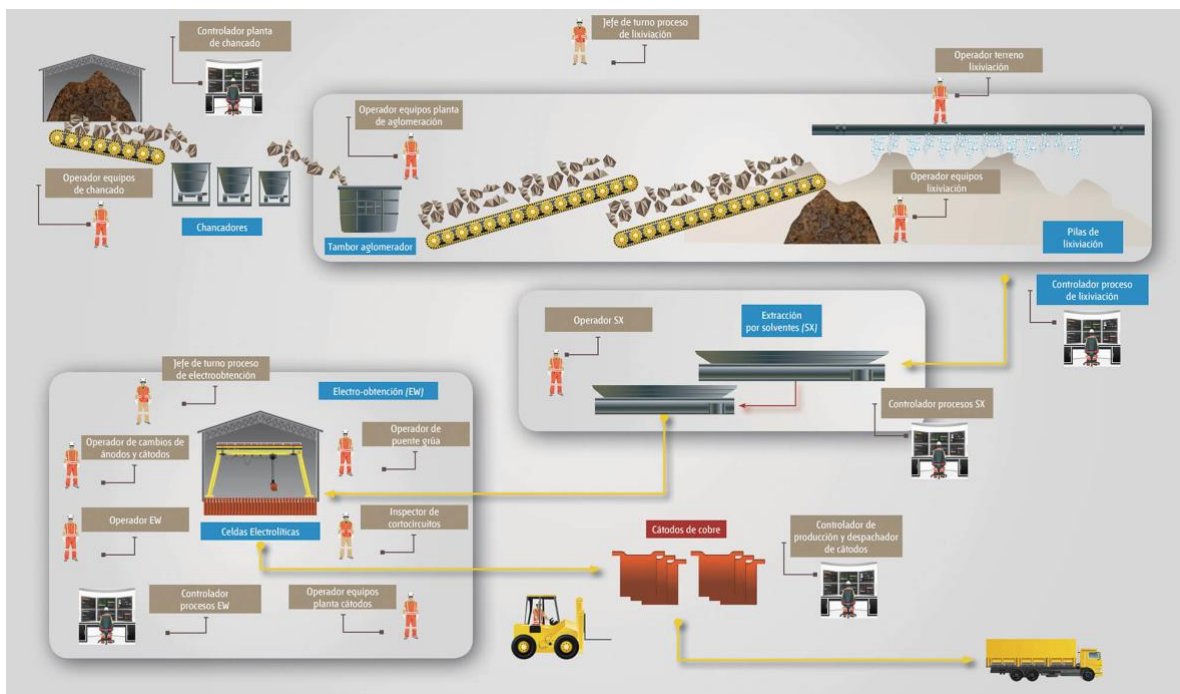


Fig. 1: Proceso de Obtención de Cobre en una Planta de Hidrometalurgia [4].

En particular las etapas de Extracción desde mina y Chancado son etapas en donde el mineral es sometido a un proceso de transporte y conminución, para ser depositado en una pila con un tamaño de partícula de App 3/4”.

En el proceso “Húmedo” de extracción de cobre, las pilas de mineral generadas en el Chancado son humectadas con flujo mezcla de Ácido Sulfúrico y solución pobre en Cobre, proveniente de las etapas de Electro obtención (esto hace que el proceso sea parcialmente cerrado). En esta humectación se produce una solución rica en cobre conocida como PLS (Pregnant Leach Solution) esta parte del proceso se conoce como **Lixiviación**.

Esta solución rica en cobre ingresa a la etapa de extracción por solventes (SX por sus siglas en Ingles), el cual es un procedimiento hidrometalúrgico en el que los metales como el cobre, se recuperan mediante el uso de agentes de extracción orgánicos [5]. El producto que se genera en esta etapa se denomina **Electrolito Rico**, el cual es solución altamente rica en cobre, la cual es impulsada a la nave de Electro Obtención o **Electro winning (EW)**, que es donde opera el sistema de cosecha, del cual la Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos es su equipo final.

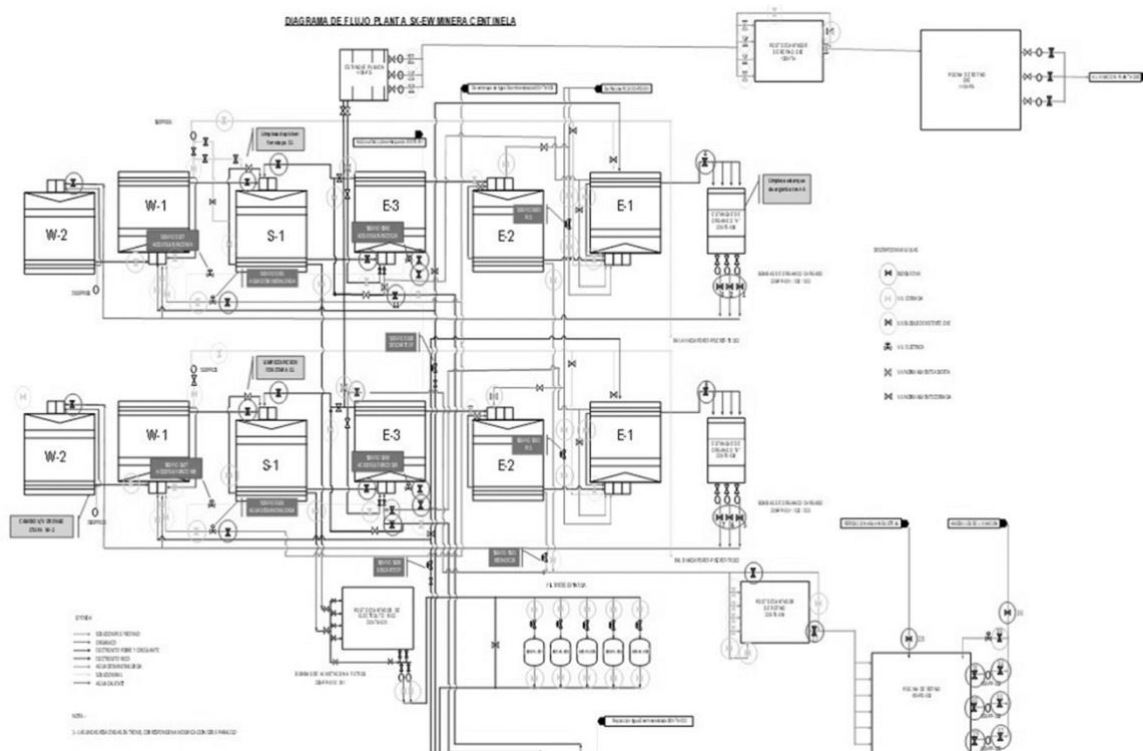


Fig. 2: Proceso de Extracción por Solventes, SX, de Minera Centinela [6].

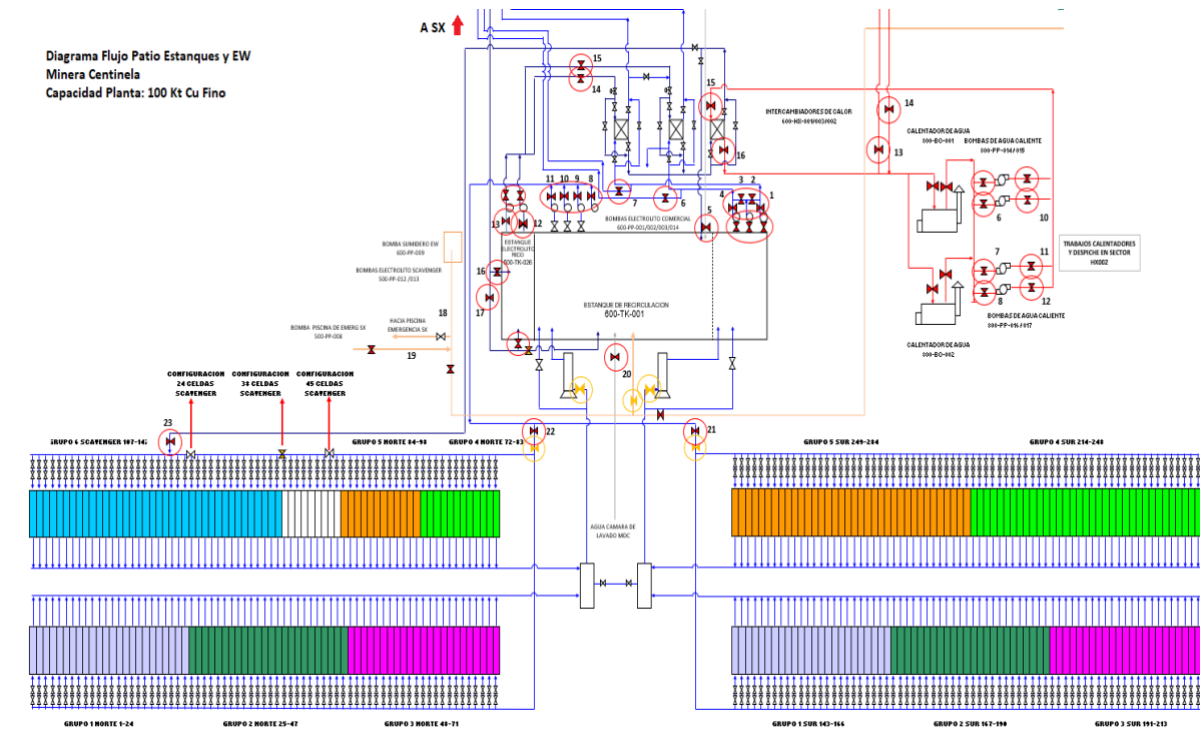


Fig. 3: Sistema de Bombeo y Celdas Nave de EW Minera Centinela [7].

4.2 Sistema de Cosecha de Cátodos Minera Centinela

El sistema de cosecha de minera centinela está compuesto por las siguientes áreas/equipos, los cuales producen a través del proceso electroquímico el producto final que son los cátodos de cobre:

- Celdas de Electro obtención.
- Puentes Grúa de Cosecha.
- Máquina Lavadora y despegadora de Cátodos.

4.2.1 Celdas de Electro obtención

Las celdas son recipientes que contienen 60 placas de acero inoxidable y 30 ánodos de plomo, en las cuales se ingresa solución de electrolito rico proveniente desde SX, y aplicando alta corriente, 45 [kAmp], se produce el proceso de electrólisis y la deposición del cobre sobre la placa de acero, esta placa de cobre demora aproximadamente 4 días en alcanzar los 38 kilogramos que es su peso optimo. La nave en particular cuenta con 243 celdas, organizadas en 5 grupos de cosecha los cuales alimentan a los puentes de cosecha.

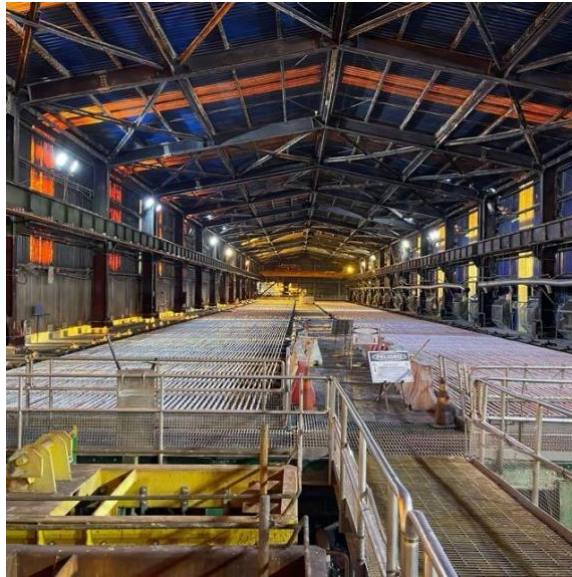


Fig. 4: Disposición Celdas Nave EW, lado norte. La configuración del lado sur es idéntica.

4.2.2 Puentes de Cosecha

Son los equipos encargados de llevar las placas de cobre desde las celdas hasta la MLDC, son dos equipos, los cuales cosechan uno hacia el lado norte de la nave y el otro hacia el lado sur. Toman 20 placas de acero por vez las cuales llevan adheridas dos cátodos de cobre los cuales tienen un peso aproximado de 38 kilogramos. Importante considerar que estos equipos si bien son dos, tienen redundancia parcial, es decir no son capaces de obtener toda la producción de cobre fino por sí mismos.



Fig. 5: Puente de Cosecha alimentando con Placas con Cobre a la MLDC.

4.2.3 Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos

Es el equipo que se encarga de separar el cobre fino de las placas de acero, las cuales retornan a la nave para un nuevo ciclo de depositación. La máquina prepara los cátodos a través de un proceso de lavado, despegue, corrugado y apilado. Posteriormente hay un proceso de enzunchado manual en patio. Al ser el equipo objeto de este trabajo ahondaremos en sus características específicas, y descripción de cada uno de los 13 procesos principales de la MLDC.

4.2.4 Características Generales y Partes de la MLDC

- **Marca:** Outukompu, actual Metso Outotec.
- **Año Construcción:** 1999.
- **Tipo Operación:** Lineal, con cámara de Prelavado y lavado, más tres Transferencias.
- **Tiempo de ciclo de despegue:** 8,8 segundos, en automático con tres Flectados.



Fig. 6: Vista General de la Máquina Despegadora de Cátodos de Centinela. Se puede observar a la izquierda de la imagen la zona de alimentación del equipo (cadena de alimentación), y a la derecha la cadena de salida de Placas de inoxidable sin cobre, las cuales recirculan al proceso de depósito.

En función al sistema de imputación de fallas y tiempos de detención de Centinela, y en línea con el árbol de componentes de la máquina (ubicaciones técnicas), los distintos sistemas mayores del equipo son:

- **Cadena de Alimentación:** Componente que recibe las placas con cobre desde los puentes grúa y lo traslada hacia el interior de la Máquina.
- **Transferencia 1:** Toma las placas con cobre desde la cadena de alimentación y los introduce en la cámara de lavado depositándolas en la cadena de lavado.
- **Camarada y Cadena de Lavado:** En la cámara de lavado se produce la limpieza del cátodo con agua desmineralizada a alta temperatura, las placas son trasladadas dentro de la cámara mediante la cadena de lavado.
- **Transferencia 2:** Toma las placas desde la cadena de lavado y las deposita en la cadena transversal, las cuales están orientadas a 90 grados entre ellas.
- **Cadena Transversal:** Esta cadena transporta las placas de cobre a través de 3 procesos; flectado, despegue (separación de cátodos de cobre) y reintegro a depósito en nave (transferencia 3).
- **Estación de Flectado:** Una vez puestas las placas en la cadena transversal, esta las posiciona en la estación de flectado, la cual mediante cilindros neumáticos flecta la placa de acero, produciendo la separación de la placa de acero de la placa de cobre.
- **Estación de Despegue:** Es el componente en donde se produce el abatimiento de las placas de cobre, retirándolas definitivamente desde la placa de acero madre. Las placas de cobre son depositadas en la cadena de arrastre, la cual tiene un movimiento a 90 grados respecto a la cadena transversal.
- **Cadena Arrastre:** Recibe las placas de cobre desde la estación de despegue y las traslada a través de la estación de corrugado y las deposita en la estación de apilado de placas.
- **Estación de Corrugado:** Se ocupa de corrugar uno de cada 10 cátodos de cobre, con el fin de hacer el paquete de cátodos más estable al momento del transporte.
- **Mesa de Apilado de Placas:** Recibe desde la cadena de arrastre y genera una “pila” de cátodos, la cual debe tener un peso final de 2500 [kg].
- **Cadena de Salida de Paquetes:** Traslada desde la mesa de apilado hacia la posición de carga en donde los paquetes de cátodos de cobre son tomados por equipos cargadores, con esto los cátodos salen de la máquina.

- **Transferencia 3:** Transfiere las placas de acero que ya no tienen cobre, y aquellas que no lograron ser separadas en la estación de flectado y estación de despegue, a las cadenas de retorno (Placas Blancas), o a la cadena de rechazo, según corresponda.
- **Cadena de Rechazo:** Las placas que no han podido ser despegadas mediante el proceso normal de la máquina deben ser despegadas de manera manual, no pueden regresar al proceso. Estas placas son retiradas mediante la cadena de rechazo.
- **Cadena de Retorno de Placas Blancas:** Las placas de acero que se les ha separado de manera exitosa el cobre deben volver al proceso, esto lo hacen a través de la cadena de retorno (Placas Blancas), las cuales son transportadas por la cadena y posteriormente tomadas por puentes grúa para reiniciar el proceso de depositación.
- **Unidad Hidráulica:** Es el equipo encargado de entregar potencia hidráulica hacia todos los sistemas que usan aceite para generar movimiento, en particular las cadenas y cilindros

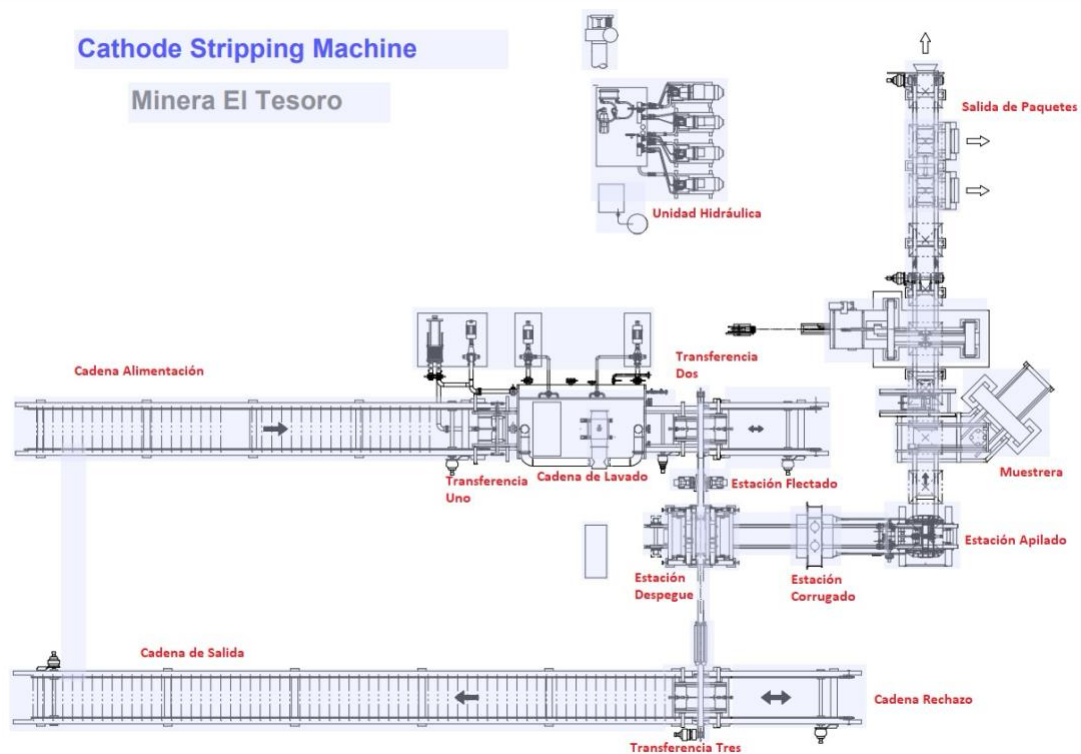


Fig. 7. Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos Centinela, vista en Planta. El equipo dispone de 13 subprocesos para la obtención del cátodo de Cobre.

Cada uno de estos sistemas de la máquina consta de una serie de elementos mecánicos, hidráulicos y eléctricos, los cuales al tener un mal funcionamiento constituyen los distintos modos de falla.

5. Marco Teórico

5.1 Definiciones de Confiabilidad

Para poder llevar adelante un análisis de políticas de mantenimiento de cualquier activo físico, se debe establecer y comprender el marco teórico que nos permite controlar las variables principales de la gestión del activo y como este se está comportando, es decir debemos conocer a que se refieren los conceptos:

- Función de densidad de probabilidad de fallas $f(t)$.
- Probabilidad acumulada de fallas $F(t)$.
- Confiabilidad.
- MTTR.
- MTBF.
- Disponibilidad.

Las definiciones matemáticas presentadas a continuación y de aplicación en los sistemas de recolección y análisis de datos utilizados en este trabajo, son las establecidas en el enfoque sistémico para cálculos de KPI de minera Centinela. El detalle está en Anexo 1.

5.1.1 Función densidad de probabilidad de fallas $f(t)$.

Definidas como la probabilidad instantánea de que un componente falle en un tiempo t . Si se considera un grupo de N componentes idénticos y como nuevos en $t=0$, se define $n'(t)$ como el número de componentes que han fallado en el tiempo $\{t\}$. La representación matemática viene dada por:

$$f(t) = \frac{n'(t)}{dt}$$
$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

5.1.2 Probabilidad Acumulada de Fallas F(t)

Es la probabilidad de que un componente falle en un intervalo de tiempo {0,t}. Al igual que en la definición anterior se considera un grupo de N componentes idénticos y como nuevos en t=0, se define n(t) el número de componentes que no han fallado en el intervalo {0,t}. La probabilidad acumulada de fallas F(t) puede ser estimada como:

$$F(t) = \frac{N-n(t)}{N}$$
$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt$$

5.1.3 Confiabilidad

Probabilidad de que un componente o sistema cumpla con los requerimientos de funcionalidad bajo ciertas condiciones de entorno (Operacional, ambiental, etc.) para un intervalo de tiempo. Se le designa con la letra R, *Reliability*. En términos simples, es la capacidad de un componente o sistema de *no fallar* en un periodo de tiempo.

$$R(t) = \frac{n(t)}{N}$$
$$R(t) = 1 - F(t)$$
$$R(t) = \int_a^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t)$$

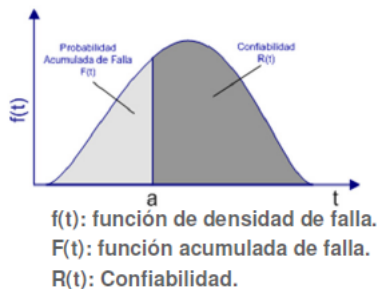


Fig. 8, descripción Grafica funciones de Confiabilidad.

5.1.4 MTBF

Main Time Between Failuire, es el tiempo promedio desde que inicia una falla hasta la ocurrencia de una falla inmediatamente posterior. Es indicativo de la confiabilidad del sistema, lo que en términos teóricos se traduce en:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

En términos prácticos y para un intervalo conocido (como una semana calendario, por ejemplo) se traduce como, la razón entre la sumatoria de los tiempos de falla, divididos por la cantidad de fallas de un sistema.

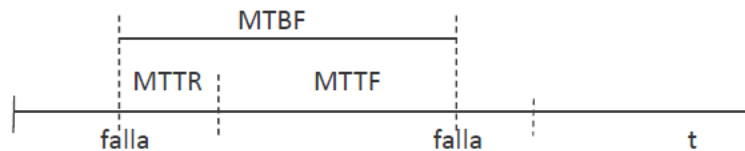


Fig. 9, descripción gráfica MTBF – MTTR

5.1.5 MTTR

Main Time to Repair, tiempo promedio que toma reparar un sistema o activo, es decir restablecer la condición de buen funcionamiento. Es un indicador que muestra la eficiencia en la intervención del mantenimiento en el caso de correctivo. Mide la capacidad de resolver fallas o imprevistos, considerando etapas de evaluación, diagnóstico y reparación del activo intervenido. Se puede calcular como el tiempo total de mantenimiento correctivo sobre la cantidad de reparaciones realizadas para un intervalo de tiempo conocido (una semana calendario por ejemplo).

5.1.6 Disponibilidad:

Representa el tiempo total que un componente está disponible para ser utilizado. Se mide en base a la confiabilidad y mantenibilidad de un componente o sistema. También puede medirse en la razón de los periodos UP TIME y DOWN TIME, de un activo:

$$A = \frac{UT}{(UT + DT)}$$

UT (up-time) representa el tiempo en que el sistema está realmente disponible para el funcionamiento.
DT (down-time) representa el tiempo fuera de servicio imputable a causas técnicas.



Fig. 10, descripción Gráfica Disponibilidad.

5. Metodología, Obtención y Análisis de Datos.

El área de mantenimiento de Minera Centinela semanalmente recolecta, ordena y analiza datos de detenciones de equipos, para la obtención de KPI's de mantenimiento los cuales a través de sus resultados son los que indican la performance de los activos existentes en la planta:

- Horas de Mantenimiento Preventivo.
- Horas de Mantenimiento Correctivo.
- Disponibilidad.
- MTTR.
- MTBF.

Para recolectar y calcular estos indicadores, la compañía cuenta con el sistema APM (Asset Performance Management) **RMES®** para el apoyo en la gestión de activos en plantas industriales y flotas, que complementa análisis a nivel de unidades básicas y complejas, mediante la metodología y análisis de bloques de confiabilidad (RBD), y que permite el desarrollo de análisis históricos de indicadores claves de proceso (KPI's). Esto con la finalidad de auditar y proyectar el rendimiento global de los activos evaluados [8].

Para lograr lo anterior es clave el correcto proceso de recolección y validación de datos. Para esto RMES cuenta con el módulo Datafill, el cual permite:

- **Importación:** Se extraen desde fuentes de información o eventos de detenciones y pérdidas de rendimiento que internamente son transformadas en detenciones, en el caso particular de Centinela, desde el control DCS de los equipos.
- **Depuración:** el módulo provee una serie de funcionalidades al usuario para la agregación, eliminación, edición, autocompletado y corrección de la información de detenciones. Este proceso es clave para asegurar la calidad del dato y por ende la representatividad de los indicadores obtenidos y debe ser llevado a cabo de manera diaria. En el caso de Centinela esa responsabilidad recae en los respectivos jefes de Turno de Ejecución de Mantenimiento y Operaciones, los cuales revisan, complementan y finalmente validan la información recolectada por el sistema.
- **Sincronización:** La información editada y depurada por los jefes de Turno se registra diariamente en un servidor de base de datos, visible para todos los usuarios del módulo. Esta información es importable o descargable en formatos como Excel lo cual permitirá realizar análisis Jack Knife para los modos de falla existentes.
- **Consolidación:** La información que es sincronizada en la base de datos RMES, puede ser validada y consolidada para obtener reportes de análisis de confiabilidad.

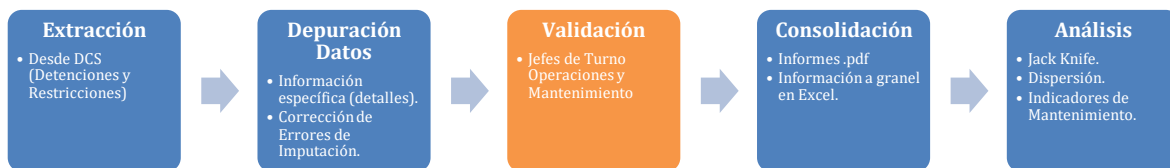


Fig. 11, Proceso de Extracción, Revisión, Validación y posterior análisis de Datos de Detenciones a través de RMES.

6.1 Análisis de Datos

A través de la recolección *parcial* de datos a través de RMES, se realizó el análisis del comportamiento de los distintos indicadores de mantenimiento de la Máquina Despegadora de Cátodos, en particular:

- Jack Knife, para el periodo Enero – junio 2022.
- Determinación de MTBF y MTTR Enero – junio 2022.
- Disponibilidad periodo Enero – junio 2022.

Se habla de recolección y obtención *parcial* ya que los diagramas de dispersión fueron realizados mediante los métodos tratados en Ingeniería de Confiabilidad II del MGA, en base a datos obtenidos de RMES en formato Excel. En el caso de los indicadores de mantenimiento fueron obtenidos directamente desde el módulo de análisis del Software. El análisis del primer semestre permite establecer cuál es el comportamiento de los modos de falla y KPI's, para posteriormente establecer acciones en la política que permitan mejorar los indicadores del equipo, especialmente los asociados a la confiabilidad. Posterior a eso, y definidos cambios a la política semanal de mantenimiento para el activo Máquina Despegadora, evaluar el comportamiento de los indicadores en el segundo semestre del 2022, en particular:

- Jack Knife, para el periodo Julio – diciembre 2022.
- Determinación de MTBF Julio – diciembre 2022.
- Disponibilidad periodo Julio – diciembre 2022.

Un diagrama sintetizado del proceso de ejecución para proponer cambios a la política semanal se muestra en la figura 12 a continuación.



Fig.12, método para obtención, análisis de datos y propuesta de Cambio de Política semanal de Mantenimiento.

Para efectos de comparación de ambos periodos del 2022, también se utilizan los valores meta de indicadores, que son las condiciones respecto de las horas asignadas a PM para el equipo, y los valores de KPI comprometidos por la Gerencia de Mantenimiento con la organización.

- Horas PM Semanal: 12 horas.
- Disponibilidad Meta: 89,5%.
- MTBF Meta: 19 [h].
- MTTR Meta: 1 [h].

Teniendo en cuenta lo anterior, las modificaciones a la política deben estar enmarcadas al uso de estas 12 horas, es decir como son distribuidas semanalmente. La política al 1 de enero del 2022 y usada durante el primer semestre es de 12 horas de detención los lunes, con la consideración particular que si el ultimo lunes del mes cae en fecha cercana a la finalización del mes, no se detiene pensando en los cumplimientos productivos.

6.2 Política Actual Ventajas y Desventajas Operacionales

Como se mencionó en el párrafo anterior, la política actual de mantenimiento del activo Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos considera detenciones semanales de 12 horas, los lunes. En esta PM semanal también se llevan a cabo actividades de mantenimiento al sistema de cosecha, es decir:

- Mantenimiento a Puentes de Cosecha.
- Mantenimiento a Puente de Retiro de Placas de Rechazo.
- Mantenimiento a Celdas de Nave EW.
- Aseo General de Máquina Lavadora y Despegadora de Cátodos.

Por lo que más allá de que se detiene la Máquina Despegadora como equipo principal del sistema de cosecha, hay otros equipos y actividades involucrados en las horas de PM. Estas actividades deben seguir realizándose semanalmente, por lo que la nueva política debe considerarlas a la hora de proponer nueva distribución en las horas de PM. En particular la política original tiene como ventajas:

- Extensión de tiempo para realizar actividades, con lo que se puede asignar menos dotación por trabajo (uso de la HH).
- Posibilidad de ejecutar trabajos emergentes.
- Posibilidad de intervenciones mayores, sobre todo de cambio de componentes mayores, como son Cadenas y elementos de desgaste.

Asimismo, como existen ciertas ventajas en las detenciones de 12 horas, estas también implican desventajas en el mantenimiento:

- Solo una intervención semanal implica que no hay oportunidad de generar revisiones a un equipo que ejecuta del orden de los 9 mil ciclos de despegue por día, esto considerando que hay componentes de la máquina que están sometidos a fatiga, ejemplo las uniones soldadas o apernadas.
- Puede implicar sobre posición de actividades Mecánicas / Eléctricas, al existir solo una detención semanal muchos sistemas deben ser intervenidos/inspeccionados por ambas especialidades, lo que genera ineficiencias por temas ya sea de espacio físico o continuidad del trabajo.
- Al ser 12 horas de detención implicará necesariamente un cambio de turno día/noche, con lo que las horas nunca son 100% efectivas, ya que las pruebas funcionales siempre serán al final de la jornada, por lo que se debe esperar al operador de la máquina y realizar pruebas para volver el equipo a condición operativa.

6.3 Datos Obtenidos Periodo Enero – Julio 2022

Se obtuvieron desde RMES los datos de detenciones de la máquina para el periodo comprendido entre el 1 de enero y 30 de junio del 2022, la información de detalle puede verse en el Anexo 2. Estos fueron organizados inicialmente en tiempos de indisponibilidad y cantidad de eventos por sistema de la máquina en el periodo, esto con el fin de establecer cuáles son los sistemas que más tiempo de correctivo necesitaron en el equipo:

Sistemas Máquina	Horas	Cantidad	MTTR
Unidad cuchillos	89,5	104,0	0,9
Cadena transversal	52,9	48,0	1,1
Down ender	32,9	26,0	1,3
Cadena receptora	29,7	13,0	2,3
Cadena de lavado	28,4	13,0	2,2
Unidad de corrugado	12,4	22,0	0,6
Cadena de catodos	11,5	15,0	0,8
Unidad de flectado	8,0	4,0	2,0
Transferencia 3	7,3	12,0	0,6
MDC	6,9	9,0	0,8
Transferencia 2	6,1	7,0	0,9
Transferencia 1	5,5	12,0	0,5
Cadena de descarga	4,3	3,0	1,4
Unidad de apilado	2,9	4,0	0,7
Camara de lavado	2,6	3,0	0,9
Unidad de muestreo	2,5	5,0	0,5
Cadena de rechazo	0,6	2,0	0,3

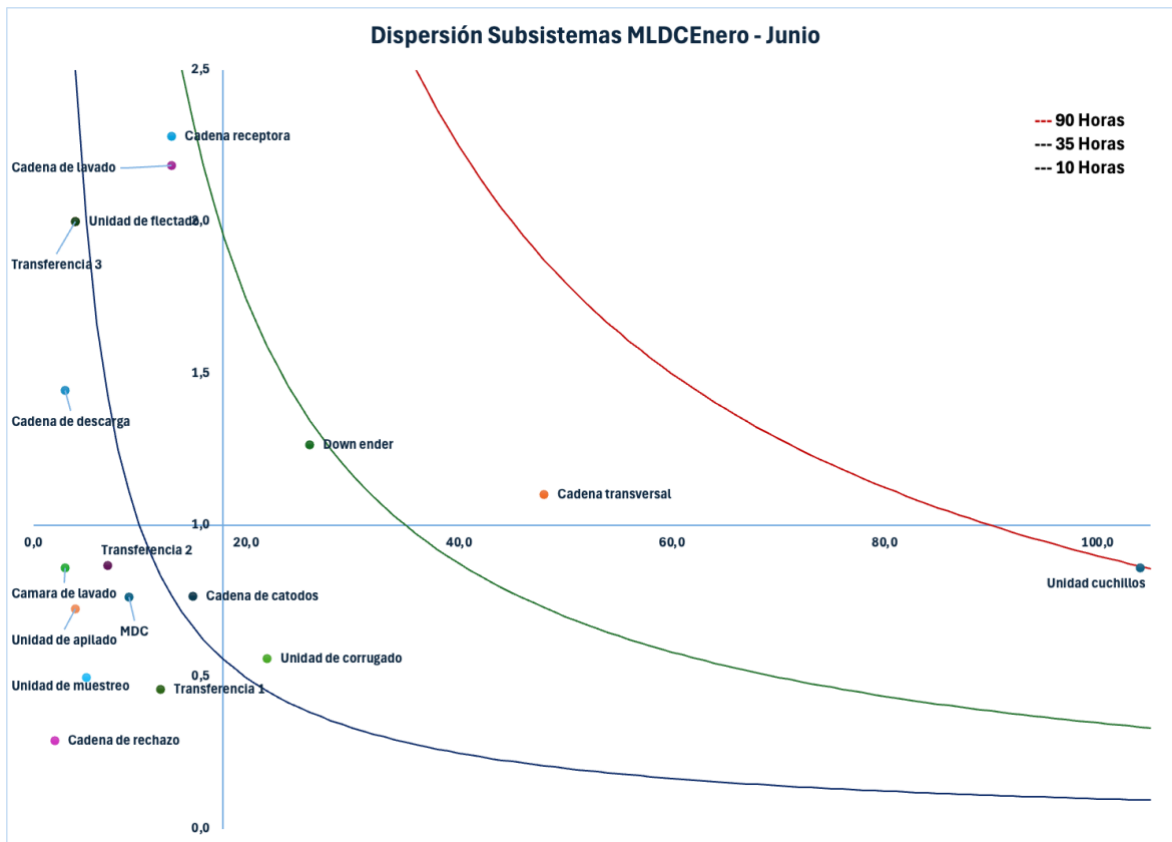
Tabla 1: Distribución de Fallas por Sistema MLDC Primer Semestre 2022.

Las mayores indisponibilidades están en aquellos sistemas en donde se produce la separación del cátodo de cobre (tal como se trató en la sección 5.31) de la placa madre de acero, esto es esperable en cierto sentido ya que el equipo debe ejercer un esfuerzo mecánico (flectar y separar) con el fin de lograr la separación, es por esto la unidad de cuchillos la con mayor cantidad de horas de indisponibilidad y cantidad de eventos. Esta unidad es la que ejecuta la acción de separación final de la placa de cobre, esto lo realiza mediante un movimiento cíclico que se efectúa a través de cilindros hidráulicos a razón de app 400 [ciclos/hora]. Lo anterior implica que esta unidad es intensiva en modos de falla asociado a ciclos, como fisuras de elementos soldados, soltura de pernos y corte de estos, fugas hidráulicas, etc.



Fig.13: Estación de Despegue (unidad de cuchillos) Máquina Despegadora de Cátodos.

Lo anterior implica que hay sistemas de la máquina que requieren más intervenciones correctivas que otros. El diagrama de dispersión en el periodo para estos elementos es el siguiente:



Gráfica 1: Diagrama Dispersión Fallas Subsistemas MLDC Enero – Junio.

Se puede observar que los subsistemas:

- Estación de Despegue (Unidad de Cuchillos).
- Cadena Transversal.
- Down Ender.

Son los sistemas que más frecuencia de falla generan en la máquina, más allá de un modo de falla en particular. En particular el sistema cadena transversal, que es el que mueve las placas con cobre desde la Transferencia 2 a la estación de Flectado y estación de despegue, trabaja con altos valores de esfuerzo y de manera continua con la operación de la máquina. En el caso del sistema down ender este es un componente de la estación de despegue que toma la placa de cobre una vez separada de la placa de acero, y la deposita en las cadenas que transportan aguas abajo hacia el proceso de corrugado y apilado.

También se puede observar que los subsistemas:

- Cadena Receptora (alimentación).
- Cadena de Lavado.

- Unidad de Flectado.

Presentan fallas agudas, producto de que operacionalmente es complejo dar las condiciones para reparar, estos sistemas transportan las placas de cobre antes de ser separadas, más específicamente en los procesos de recepción y lavado; esto implica que cuando tienen una falla cualquiera las cadenas deban ser vaciadas de manualmente lo cual es complejo por el peso de estas.

6.4 Indicadores de Desempeño, Grafico de dispersión y Análisis de modos de falla principales Primer Semestre 2022.

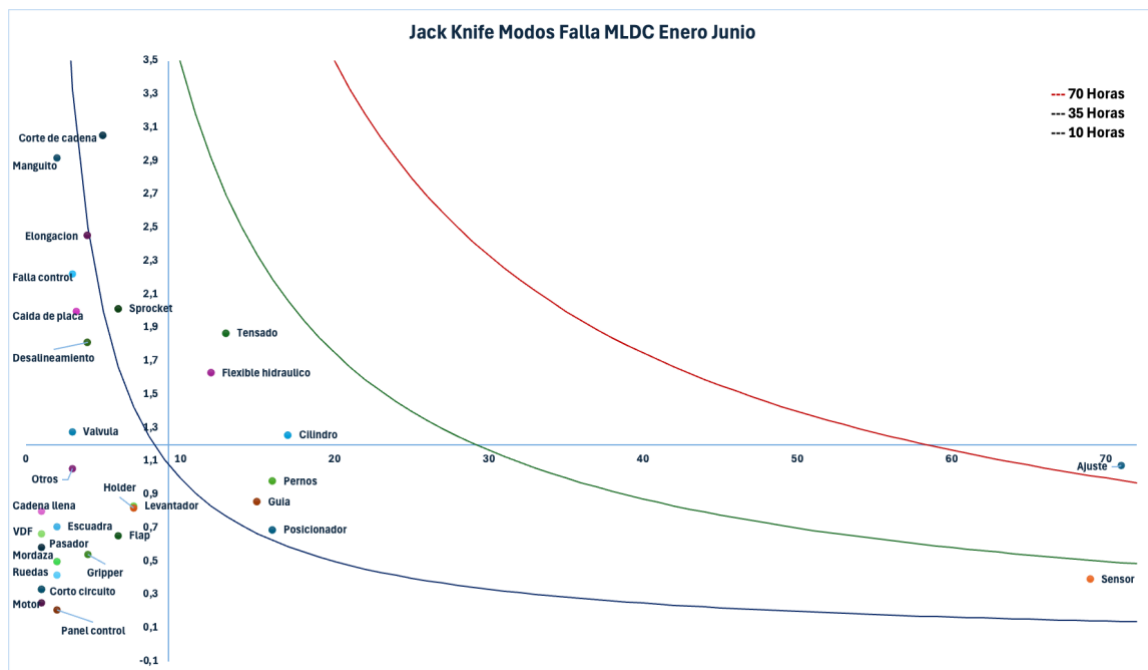
Los indicadores de mantenimiento para el periodo de análisis fueron los siguientes:

KPI's	Real	Meta
MTBF [h]	14,2	19
MTRR [h]	1,1	1
Disponibilidad %	83,1	89,5

Tabla 2: Resultados de Mantenimiento Primer Semestre.

Se observa que no se cumple con los indicadores en ninguno de sus puntos, con brechas importantes en el MTBF y la disponibilidad.

En el primer semestre del año, los modos de falla de la máquina y su diagrama Jack Knife, es el siguiente:



Grafica 2: Jack Knife Máquina Despegadora de Cátodos Enero – junio 2022.

También de manera más detallada podemos observar la tabla 3 con los principales modos de falla del primer semestre del año, ordenados de manera decreciente y el correspondiente MTTR para cada uno de esos modos,

Modo de Falla	Indisponibilidad total [h]	Eventos	MTTR
Ajuste	76,2	71	1,1
Sensor	27,0	69	0,4
Tensado	24,3	13	1,9
Cilindro	21,3	17	1,3
Flexible hidraulico	19,6	12	1,6
Pernos	15,7	16	1,0
Corte de cadena	15,3	5	3,1
Guia	12,8	15	0,9
Sprocket	12,1	6	2,0
Posicionador	11,0	16	0,7
Elongacion	9,8	4	2,5
Desalineamiento	7,3	4	1,8
Falla control	6,7	3	2,2
Calda de placa	6,5	2	3,3
Levantador	5,8	7	0,8
Manguito	5,8	2	2,9
Holder	5,7	7	0,8
Flap	3,9	6	0,7
Valvula	3,8	3	1,3
Otros	3,2	3	1,1
Gripper	2,2	4	0,5
Escuadra	1,4	2	0,7
Balancin	1,0	2	0,5
Mordaza	1,0	2	0,5
Ruedas	0,8	2	0,4
Cadena llena	0,8	1	0,8
VDF	0,7	1	0,7
Pasador	0,6	1	0,6
Panel control	0,4	2	0,2
Movimiento de apoyo	0,3	1	0,3
Corto circuito	0,3	1	0,3
Motor	0,3	1	0,3
Total general	303,6	301	1,0

Tabla 3: Modos de Falla Primer Semestre 2022 MLDC Centinela

En particular los modos de fallas más crónicos y agudos, los cuales representan el 60% del total de la indisponibilidad son:

- **Ajuste, (25% de indisponibilidad):** En particular este modo menciona todo lo que es “sintonización” de todos los pasos mecánicos y eléctricos de la máquina para que ejecute correctamente la función del despegue: apriete de pernos, ajuste de guías de placas, ajuste de presiones de trabajo, orientación de los aspersores de lavado, orientación de guías de teflón, etc. Son detenciones que no requieren sustitución de componentes pero que implican que el equipo no funcione de manera correcta en

la ejecución del ciclo de despegar la placa de cobre y que en algunos casos demandan tiempo, de ahí su mayor MTTR.

- **Sensor (9% de indisponibilidad):** El equipo cuenta con una serie de sensores los cuales sufren diferentes tipos de intervenciones, ajustes en la intensidad de la señal, daños por golpes o daños en el cableado. Muchas veces son ajustados por solicitud particular del operador de la máquina al observar este que no se está cumpliendo el ciclo de manera correcta.
- **Tensado (8% de indisponibilidad):** Las cadenas que mueven las placas de cobre a través del equipo requieren tensado frecuente, dado los constantes golpes de carga y el esfuerzo propio del peso de las placas, esto en casos como la cadena de alimentación y lavado demanda bastante tiempo ya que implica trabajos de soldadura.
- **Cilindro (7% de indisponibilidad):** Este modo está asociado a fallas tanto mecánicas, como quiebre de vástago del cilindro y soltura de la rótula del cilindro, como a fallas hidráulicas por fugas internas. La máquina opera 12 tipos diferentes de cilindros.
- **Flexible Hidráulico (6,5% de indisponibilidad):** Roturas de los flexibles que energizan hidráulicamente a los cilindros, en general por desgaste o por daños producto de golpes de placas ya que van relativamente expuestos en las zonas de movimiento.
- **Pernos (5,2 % de indisponibilidad):** Este modo de falla está asociado a soltura de pernos y a corte de estos. Ocurre en los elementos que están expuestos a ciclo en la estación de despegue, los cuales al soltarse hacen perder al equipo el buen funcionamiento o derechamente se cortan.

7. Propuesta Mejoramiento a la Política de Mantenimiento

7.1 Análisis

Del punto anterior se observa que no se ha cumplido para el periodo ninguno de los indicadores de mantenimiento. Hay modos de falla fuera de control y crónicos, con alto índice de indisponibilidad, lo cual ha impactado en el indicador final. Como acción de corto plazo y mejorar estos indicadores, se hizo necesario proponer cambios a la política de mantenimiento, teniendo como objetivo recuperar los valores de KPI para cumplir con los indicadores meta. Del análisis del diagrama de dispersión Jack Knife en la gráfica 2 y los modos de falla principales de la máquina, se pueden observar condiciones como las siguientes:

- Los dos modos de falla crónicos de mayor peso en general son modos de falla que no implican cambio componentes o reparación de elementos existentes, sino que ajustes de elementos internos de la máquina los cuales pierden sus posiciones debido al trabajo cíclico de la Máquina y no necesariamente por fallas (roturas) de componentes.
- Los sistemas que tienen mayor número de fallas dentro del equipo son la Estación de despegue y cadena transversal, que son las que más se encuentran sometidas a esfuerzos mecánicos y que ejecutan movimientos cíclicos.
- En términos físicos los sistemas que más indisponibilidad generan están concentrados en un sistema en particular de la máquina.

Se puede observar que una detención a la semana se muestra insuficiente para mantener los niveles de ajuste de los sistemas de la máquina, y es necesario una acción de corto plazo para evitar fallas por solturas y ajustes para generar impactos en el corto plazo.

Teniendo en consideración los puntos anteriores, es factible buscar una redistribución del tiempo de PM (Política) agregando una segunda intervención semanal, la cual debe intervenir el equipo de manera acotada y pensando en la prevención de los modos de falla que mayor impacto tienen, buscando volver a control con estos modos y aumentando la disponibilidad y MTBF. La nueva distribución debe buscar:

- Realizar los ajustes necesarios en el equipo para que no pierda sus condiciones de operación.

- Lo anterior se realiza a través de reaprietes de componentes, cambios de pernos si es necesario, tensado de cadenas y Chequeo de todos los elementos de la Estación de Despegue.
- Intervenir de manera Especifica los sistemas que más indisponibilidad generan, teniendo en consideración que el tiempo en la intervención será siempre acotado. Se debe buscar concentración de los recursos de HH para abarcar todos los puntos de posibles fallas dentro de los sistemas Estación de despegue y Cadena Transversal.
- La nueva distribución de PM debe permitir intervenir los otros equipos del sistema de cosecha, de acuerdo con lo indicado en el punto 5.2

7.2 Propuesta de Mejoramiento

En función a los análisis del primer periodo del 2022, se propuso para el segundo semestre del año una mejoramiento de la distribución de horas de PM del sistema de cosecha, enfocado en los principales modos de falla de la Máquina despegadora. La Figura 14 y 15 muestra la distribución de horas de PM a junio del 2022 y la propuesta de cambio:

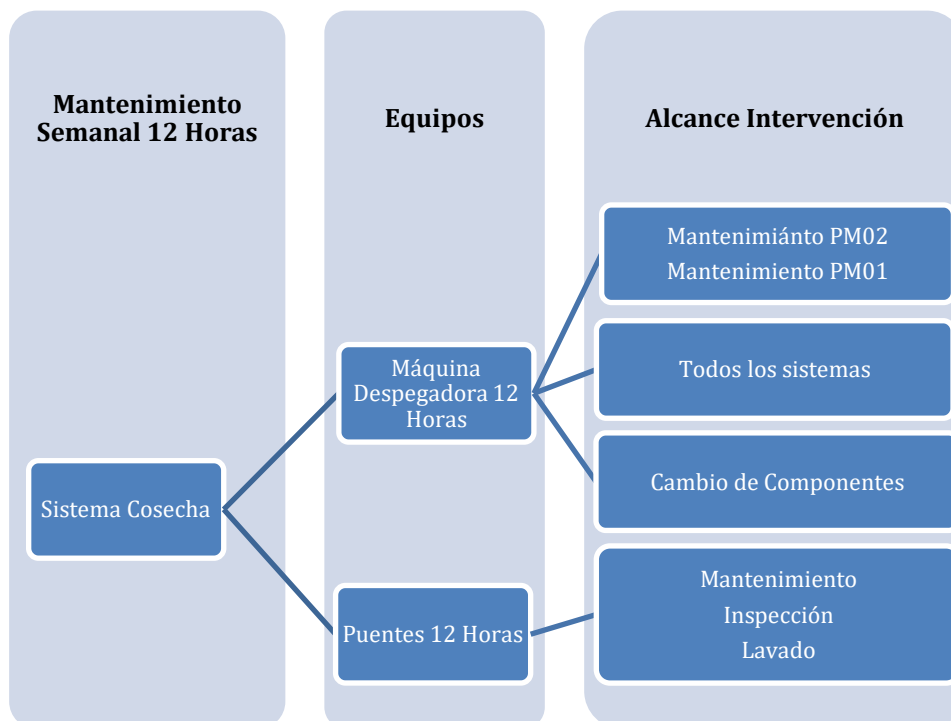


Fig. 14, Distribución y Alcance Horas PM a junio del 2022.

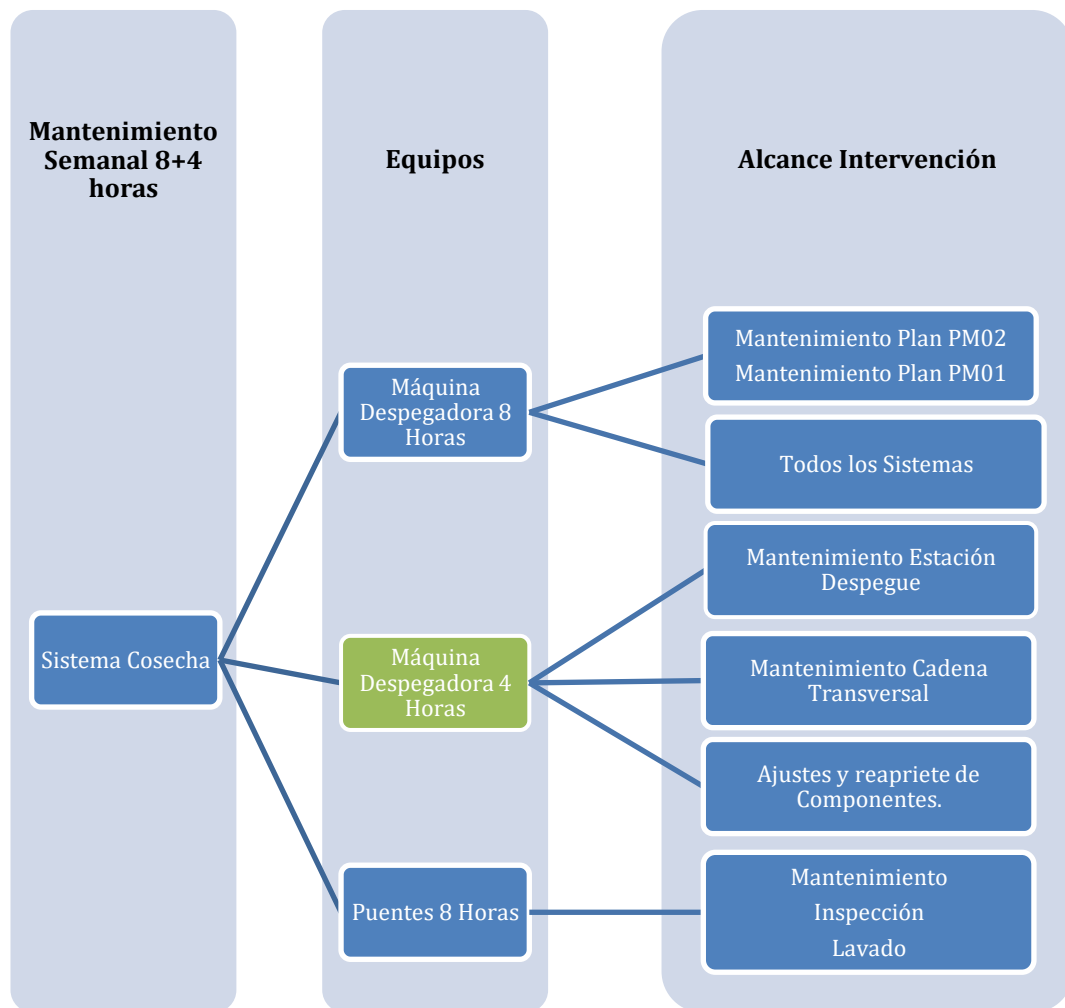


Fig. 15 Distribución y horas de PM Implementado Entre Julio y diciembre de 2022.

En resumen, los cambios realizados fueron:

- Detener la política de 12 horas de PM semanal.
- Iniciar una política de dos PMs semanales, una detención de 8 horas los lunes y una segunda detención de 4 horas los viernes.
- Detención de los Viernes con foco en modos de falla y sistemas con más indisponibilidad de la máquina, corrección de amenazas a la continuidad.

7.3 Datos Obtenidos Periodo Julio - diciembre 2022

De acuerdo con los cambios propuestos, entre el 1 de Julio al 31 de diciembre del 2022 se aplicó la política definida en el punto 5.7.2.

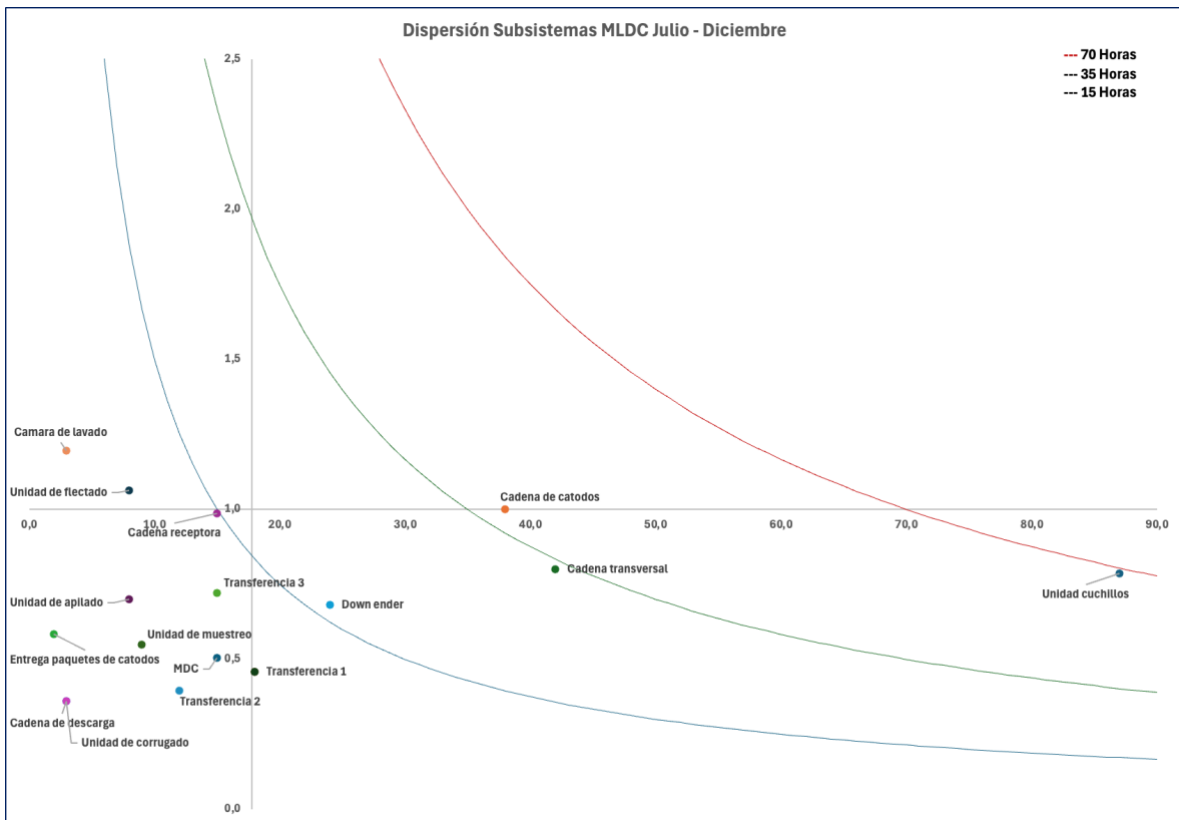
Se obtuvieron desde RMES los datos de detenciones de la máquina para el periodo comprendido entre el 1 de julio y 31 de diciembre del 2022, la información de detalle puede verse en el Anexo 2. Estos fueron organizados inicialmente en tiempos de indisponibilidad y cantidad de eventos por sistema de la máquina, esto con el fin de establecer cuáles son los sistemas que más tiempo de correctivo necesitaron en el equipo:

Etiquetas de fila	Horas	Cantidad	MTR
Unidad cuchillos	68,4	87,0	0,8
Cadena de catodos	38,0	38,0	1,0
Cadena transversal	33,6	42,0	0,8
Down ender	16,4	24,0	0,7
Cadena receptora	14,8	15,0	1,0
Transferencia 3	10,8	15,0	0,7
Unidad de flectado	8,5	8,0	1,1
Transferencia 1	8,3	18,0	0,5
Cadena de lavado	8,1	9,0	0,9
MDC	7,6	15,0	0,5
Unidad de apilado	5,6	8,0	0,7
Unidad de muestreo	5,0	9,0	0,6
Transferencia 2	4,8	12,0	0,4
Camara de lavado	3,6	3,0	1,2
Entrega paquetes de catodos	1,2	2,0	0,6
Cadena de descarga	1,1	3,0	0,4
Unidad de corrugado	1,1	3,0	0,4
Cadena de rechazo	0,8	1,0	0,8
Cadena de apilado 2	0,5	1,0	0,5

Tabla 4: Distribución de Fallas por Sistema MLDC Segundo Semestre 2022.

De los datos obtenidos se puede apreciar una disminución en los tiempos de indisponibilidad en general, si bien se mantiene el sistema de Estación de despegue (unidad de cuchillos) como el sistema con mayor cantidad de eventos y de indisponibilidad, los otros sistemas de la máquina se mantienen como los sistemas que más indisponibilidad generan.

De la misma manera, la dispersión de las fallas en de los sistemas de la Máquina es el que sigue:



Grafica 3: Diagrama Dispersión Fallas Subsistemas MLDC Julio – Diciembre.

Se puede observar una menor dispersión que en la gráfica 1, aunque como se comentó en el párrafo anterior los subsistemas que más indisponibilidad generan son los mismos que en el primer periodo de análisis, manteniéndose una proporción importante en la cantidad de fallas los relacionados a la estación de despegue (unidad de cuchillos) y las cadenas transversal y de cátodos.

En general las curvas isométricas del diagrama de dispersión nos muestran que existe una mejora en los valores principales respecto del primer semestre, con excepción de los tres subsistemas mencionados anteriormente. Se puede observar que los sistemas de la máquina tienen valores de indisponibilidad bajo control en la mayoría de los casos lo cual muestra una mejora respecto del primer periodo del año.

7.4 Indicadores de Desempeño, Grafico de dispersión y Análisis de modos de falla principales Segundo Semestre 2022.

Los indicadores de mantenimiento para el periodo de análisis se muestran en la tabla 5:

KPI's	Real	Meta
MTBF [h]	19,8	19
MTTR [h]	0,8	1
Disponibilidad %	89,8	89,5

Tabla 5: Resultados de Mantenimiento Segundo Semestre.

Se observa una mejora de todos los KPI's de mantenimiento, pasando a cumplimiento de los valores meta establecidos.

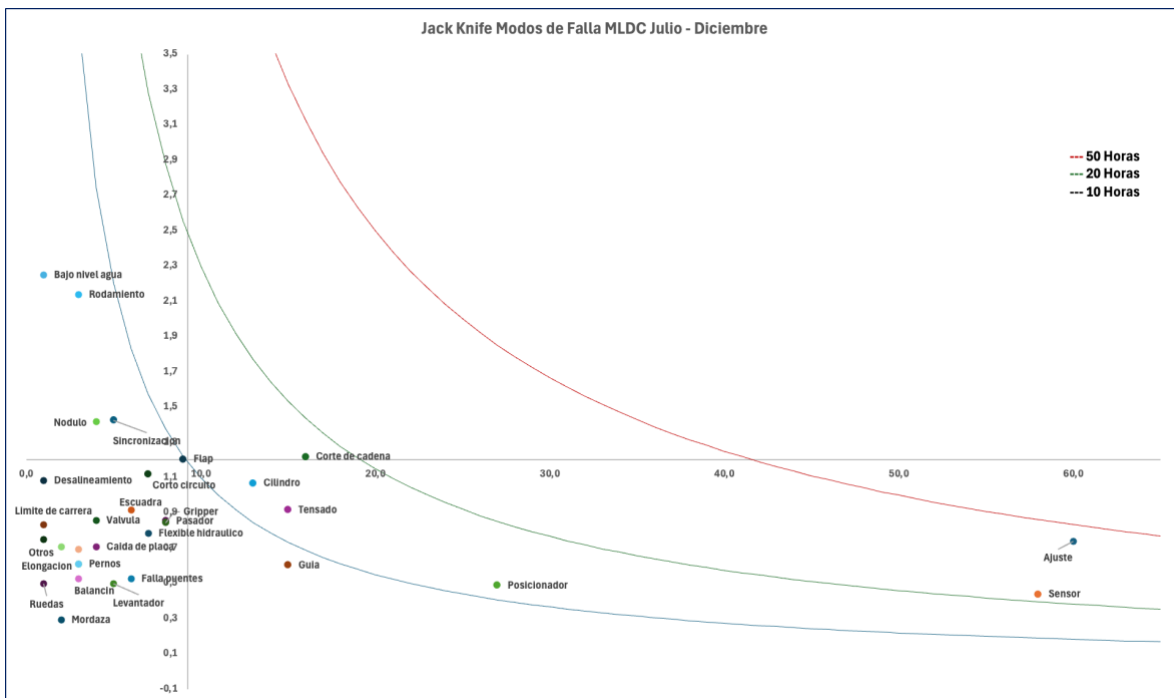
En lo referido a los distintos modos de falla la tabla 6 muestra la distribución de estos, para el segundo semestre del 2022:

Modo de Falla	Duración total [h]	Eventos	MTTR
Ajuste	44,3	60,0	0,7
Sensor	25,4	58,0	0,4
Corte de cadena	19,5	16,0	1,2
Cilindro	13,9	13,0	1,1
Tensado	13,8	15,0	0,9
Posicionador	13,2	27,0	0,5
Flap	10,8	9,0	1,2
Guia	9,1	15,0	0,6
Corto circuito	7,8	7,0	1,1
Sincronizacion	7,1	5,0	1,4
Pasador	6,8	8,0	0,9
Gripper	6,8	8,0	0,8
Rodamiento	6,4	3,0	2,1
Holder	5,8	5,0	1,2
Nodulo	5,7	4,0	1,4
Flexible hidraulico	5,5	7,0	0,8
Escuadra	5,5	6,0	0,9
Valvula	3,4	4,0	0,9
Falla puentes	3,2	6,0	0,5
Caida de placa	2,8	4,0	0,7
Levantador	2,5	5,0	0,5
Bajo nivel agua	2,3	1,0	2,3
Bobina	2,1	3,0	0,7
Pernos	1,8	3,0	0,6
Elongacion	1,8	3,0	0,6
Balancin	1,6	3,0	0,5
Otros	1,4	2,0	0,7
Desalineamiento	1,1	1,0	1,1

Tabla 6: Modos de Falla Primer Semestre 2022 MLDC Centinela

Si bien el modo de falla ajuste se mantiene como que el genera mayor indisponibilidad, hay una disminución significativa en las horas de indisponibilidad generadas por este modo de falla y los otros, se visualiza también que hay modos que dejan de tener un aporte significativo a la indisponibilidad del equipo, como es la soltura y corte de pernos.

Respecto de los MTTR también se visualiza una mejora respecto de los valores del primer semestre, rondando este valor en las 0,8 [h] por reparación.



Gráfica 4: Jack Knife Máquina Despegadora de Cátodos Julio – diciembre 2022.

En la gráfica 4 de Jack Knife, se aprecia una disminución importante en la dispersión de los modos de falla respecto de la gráfica 3 (primer semestre), manteniéndose una cantidad importante de ellos bajo control. Sin embargo, se mantienen de manera crónica el modo de ajuste y el modo sensor, aunque con escalas menores al del primer semestre. Hay modos de falla que mejoran de manera sustantiva como es el modo Pernos y flexible hidráulico y otros que mantienen sus valores constantes o incluso aumentan, caso de posicionador y corte de cadena. También se observa que disminuyen las fallas agudas, esto también se puede observar con una disminución de las horas de mantenimiento correctivo y la mejora del MTTR.

8. Análisis Comparado Ambos Periodos

Los resultados de ambos periodos de análisis y el consolidado anual para los KPI's de mantenimiento del año 2022 se muestran en la tabla 7:

KPI's	Enero - Junio	Julio - Diciembre	Resultado Anual	Meta
MTBF [h]	14,2	19,8	17,0	19
MTTR [h]	1,1	0,8	0,9	1
Disponibilidad %	83,1	89,8	86,4	89,5

Tabla 7: Resultados de MTBF, MTTR y disponibilidad año 2022.

Los valores de MTBF y disponibilidad muestran una mejora en el segundo semestre, aunque no lo suficiente para lograr una mejora a nivel de cumplimiento del indicador en sus valores anuales, con excepción del MTTR en donde el indicador anual logra cumplir con los valores meta. Si bien no se logra cumplir con los indicadores en los casos señalados anteriormente, hay una mejora significativa en los tres KPI's, lo que habla que el cambio de política tuvo un impacto positivo en el comportamiento del activo. También se observa una mejora de las gráficas de dispersión de Jack Knife y la disminución significativa de los eventos agudos.

Ahora bien, es importante señalar que, si bien se observa mejora en los valores, estas mejoras podrían calificarse de mejoras en términos de valores numéricos absolutos, no en erradicación de los modos de falla más frecuentes. La tabla 8 muestra una comparación de los 10 modos de falla que más indisponibilidad generan en el año 2022, ordenados y el ranking que cada uno de ellos ocupó el primer semestre y el ranking que ocupó el segundo semestre. Se indica con flecha de color amarillo los modos de falla que mantienen su ranking en ambos periodos, en verde los modos de falla que mostraron mejora en su ranking (esto quiere decir una disminución en la indisponibilidad por ese modo). Los indicados en color rojo son aquellos que aumentaron sus valores de indisponibilidad por lo que ocupan un lugar más alto en el ranking.

Modo Falla	Enero - Junio	Julio - Diciembre	Mejora
Ajuste	1	1	→ 0
Sensor	2	2	→ 0
Tensado	3	5	↑ 2
Cilindro	4	4	→ 0
Flexible hidraulico	5	16	↑ 11
Pernos	6	24	↑ 18
Corte de cadena	7	3	↓ -4
Gula	8	8	→ 0
Sprocket	9	30	↑ 21
Posicionador	10	6	↓ -4

Tabla 8: Comparación entre posiciones (ranking) de modos de falla entre ambos semestres del 2022.

Se puede observar que los dos primeros modos de falla se mantienen sin cambios en ambos semestres del año. Hay 4 modos de falla que tienen una mejora en su indicador y dos que tienen una desmejora, es decir aumenta la indisponibilidad. Salvo tres casos (Flexibles Hidráulicos, Pernos y Sprocket) se mantienen los mismos modos de falla en ambos semestres, respecto de los modos de falla que salieron de los primeros lugares se implementaron acciones adicionales de mejora, lo cual puede dar pie a otras propuestas de mejora. Lo anterior indica que, si bien un cambio en la distribución de los tiempos de PM fue una decisión correcta y una herramienta válida para mejorar los valores de KPI, se deben implementar otras acciones de mantenimiento para erradicar los modos crónicos de manera definitiva.

9. Propuesta Mejoramiento Política de Mantenimiento

En la sección anterior se pudo observar que el cambio de distribución de tiempos de mantenimiento programado fue una acción de corto plazo correcta, en el sentido que ha permitido mejorar la confiabilidad del equipo en el segundo semestre del 2022, disminuir los tiempos por fallas agudas, y mejorar el indicador de respuesta del equipo de mantenimiento. Todo lo anterior ha permitido disminuir los costos de oportunidad por detención de la cosecha. Pero, como acción de erradicación de modos de falla y mejora continua se muestra insuficiente. Para lograr la erradicación de modos de falla se debe apuntar a mejoras en la estrategia de mantenimiento, esto alineado al modelo operativo de Antofagasta Minerals, con relación al mantenimiento de sus activos críticos, esto presentado en el Anexo 3:

“Una estrategia de mantenimiento es el conjunto de actividades que se deben realizar a un activo físico con el fin de preservar su condición productiva a capacidad de diseño, para el período de tiempo que fue concebido y a los costos presupuestados [9]”.

El párrafo anterior implica que se deben implementar acciones para la estrategia de mantenimiento, es decir:

- Diseñar y gestionar un equipo de mantenimiento.
- Mejorar Efectividad de los Equipos, en particular el de inspección.
- Mejorar efectividad y eficiencia del Mantenimiento.
- Entrenamiento, capacitación.

En relación con estas acciones (en particular la primera), las acciones deben ser ejecutadas por un equipo multidisciplinario, el cual se le denomina Célula de Mantenimiento:

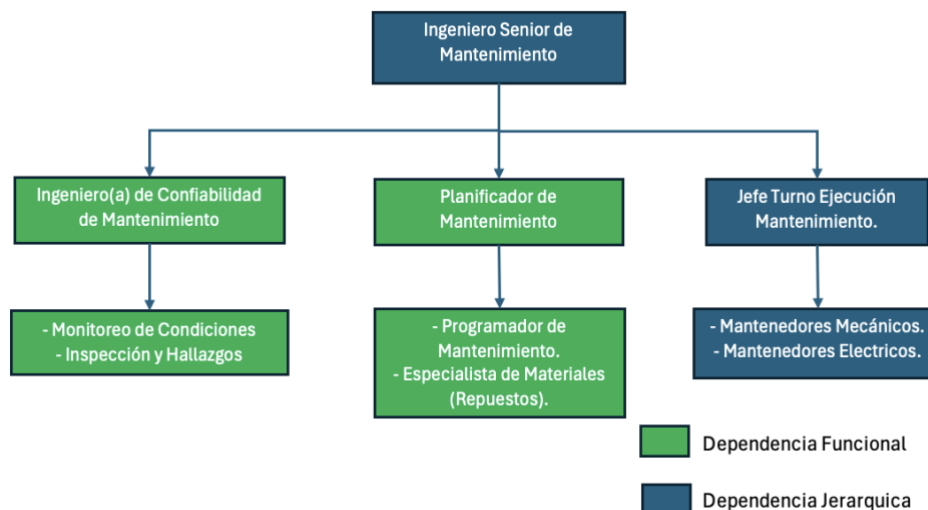


Fig. 16, Célula de Mantenimiento AH, Minera Centinela.

Este equipo que representará a las áreas de ejecución, planificación y confiabilidad de mantenimiento deberá implementar acciones de la política de mantenimiento de la Máquina

despegadora de cátodos en línea con los lineamientos mencionados anteriormente. Las siguientes siete acciones son las propuestas a implementar:

- **Seguimiento de materiales y componentes:** Se debe revisar semanalmente la cobertura de repuestos críticos a través de los consumos de bodega, y generar periódicamente revisiones a la clasificación de materiales para calificarlos como material a pedido o reposición automática, con el fin de minimizar los quiebres de stock. También como acción de mejora de los tiempos de respuesta se debe implementar una bodega con elementos de alta rotación en las instalaciones de mantenimiento adyacentes a la máquina. Esto con el fin de dar cobertura rápida en fallas de elementos de sustitución rápida y que pueden demorar por efectos de retiro desde la bodega. Minimizar la ocurrencia de falsos stock de componentes.
- **Programación Semanal, distribución de tiempos:** Se debe mantener el programa semanal de mantenimiento con dos PM semanales de 8 y 4 horas de duración. Esto permite mantener bajo control los modos de falla repetitivos y mejorar la cobertura para los modos en donde se requieren ajustes de componentes más que cambios de ellos.
- **Estándares de ejecución:** Se deben actualizar los estándares de ejecución y procedimientos de mantenimiento, ya que estos se encuentran desactualizados y con brechas en el detalle de la ejecución de los trabajos, lo cual hace que no sean elementos de referencia técnica para los mantenedores en terreno. Esto ha propiciado fallas por desconocimiento en montaje de componentes o por repetición de prácticas de mantenimiento incorrectas. Para esta actualización se deberá contar con participación de personal especializado o en su defecto de especialistas del fabricante del equipo.
- **Generación de Información Planimétrica actualizada para componentes con fatiga:** Las detenciones por efecto de grietas que requieren reparaciones con soldadura son recurrentes, sobre todo en aquellas posiciones en donde se produce cambio en el movimiento de la placa o la acción mecánica de despegue. Una manera de controlar esos modos es cambiar estos elementos de manera periódica en PM semanales, pero para aquello se debe implementar los planos correspondientes, los cuales no son parte de la información técnica provista por el

fabricante. Estos planos deben considerar posibles mejoras que se visualicen en el sitio, ya sea de geometría o de materialidades de los componentes.

- **Capacitación del Personal:** El personal de ejecución de mantenimiento debe contar con conocimientos acabado del funcionamiento del equipo, en particular de la manera de resolución y gestión de los distintos modos de falla de la Máquina despegadora. Esto está muy asociado a la actualización de los estándares y procedimientos de ejecución, ya que permite minimizar errores de juicio al gestionar fallas o en el momento de ejecutar mantenimientos preventivos.
- **Inspección con Equipo Detenido:** Se debe generar actividades periódicas de inspección en los mantenimientos semanales (equipo detenido). Esto permite verificar estado de componentes y levantar avisos de mantenimiento para su reparación/cambio en futuras intervenciones por PM, o en el caso de hallazgos de intervención inmediata, prevenir una falla con el equipo en operación.
- **Monitoreo de Condiciones:** Generar programa de monitoreo de equipo en operación, en particular análisis de vibraciones de componentes como bombas centrifugas de agua y lavado de cátodos, y bombas hidráulicas que alimentan a los sistemas de movimiento. También ensayos no destructivos a componentes expuestos a carga cíclica (soldaduras) en los mantenimientos semanales, con el fin de reparar en el momento (emergentes) o levantando avisos de mantenimiento para su cambio en programas posteriores.

Las acciones anteriormente propuestas deben ser implementadas en un periodo de 6 meses, teniendo en consideración que algunas de ellas requerirán aprobación de recursos por parte de la Gerencia. También deberán ser controladas en su avance mediante las reuniones semanales que la Gerencia de mantenimiento considera para fines de revisión de indicadores de mantenimiento o de gestión de las áreas:

- Foro de desempeño semanal.
- Reunión de Programación.
- Reunión de Hallazgos/vulnerabilidades.
- Plan de Implementación Táctico, PIT.
- Análisis de Causa Raíz, RdP.

Es importante considerar que estas nuevas actividades/procesos, deberán considerar las gestiones de cambio correspondientes, con el fin de evaluar los riesgos de seguridad, tanto a las personas como activos físicos involucrados.

10. Conclusiones

A través de la revisión y análisis de indicadores de desempeño, junto con herramientas de análisis como diagramas de Jack Knife y software de recolección de datos, ha sido posible detectar los modos de falla principales de la Máquina Despegadora de Cátodos de Minera Centinela, específicamente en el primer semestre del año 2022. Con estos datos se propuso un cambio a uno de los inputs de la política de mantenimiento del activo, esto es la redistribución de horas de PM desde una detención semanal de 12 horas, a dos detenciones semanales: una de 8 horas y otra de 4 horas, esto se llevó a cabo durante todo el segundo semestre del 2022. Los resultados de esta medida, respecto de los KPI's, mostraron una mejora de un orden del 30% en MTBF y MTTR. En el caso de la Disponibilidad un 6%. Esto nos permite concluir que un cambio en los tiempos de detención de la MLDC puede ser una acción que permite de manera rápida y sin una reorganización o costo importante, mejorar los indicadores de desempeño.

Los resultados anteriores, sin embargo, han arrojado que los modos de falla se han mantenido prácticamente inalterables en su orden en las detenciones no programadas, es decir, el cambio en los tiempos de detención no ha generado erradicación de los modos de falla principales, sino más bien la disminución de la frecuencia de estos.

Es por lo anterior que un mejoramiento a la política de mantenimiento debe hacerse cargo a través de herramientas de gestión más integrales la erradicación de los modos de falla: este mejoramiento a la política considera acciones de mantenimiento a nivel de ejecución, planificación y confiabilidad, las cuales, combinadas a través de un equipo de mantenimiento, llamado célula de Mantenimiento, debe implementar las siete acciones específicas propuestas:

- Seguimiento de Materiales y Componentes.
- Programación Semanal, distribución de tiempos.
- Estándares de Ejecución.
- Generación de Información Planimétrica Actualizada.
- Capacitación del Personal.
- Inspección con Equipo detenido.
- Monitoreo de Condiciones.

Estas acciones permitirán una acción más robusta frente a los diferentes modos de falla al abordarlos en su prevención y no solo en su corrección, que fue lo que se realizó en el segundo semestre del 2022. Esta es una acción que está más en línea con la gestión de activos y que puede ser aplicada en los demás activos de la planta, siempre considerando sus características particulares.

Lo anterior no hace sino reafirmar como la aplicación de un modelo de gestión de activos en plantas de proceso es fundamental para la obtención de resultados sustentables y que estos modelos deben ser implementados de manera consistente: en general los equipos de mantenimiento se conforman, ya sea por necesidad, disponibilidad de recursos o por cumplimiento, en solo llevar el KPI a control lo cual es sumamente importante pero no suficiente. Se deben generar estas políticas como modelos integrales de gestión, no solo para el activo objeto del estudio, sino que, a nivel de toda la operación, esto es algo que demandará un esfuerzo importante, pero permitirá en el largo plazo generar una cultura de gestión de mantenimiento que permitirá mejor utilización de los activos y por consecuencia una mayor competitividad del negocio.

11. Referencias

- [1] El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la Confiabilidad Operacional, Ing. Rosendo Huerta Mendoza. [Criticidad Operacional](#).
- [2] Anuario de estadísticas de Cobre y Otros Minerales 2003 – 2022. Comisión Chilena del Cobre, página 154.
- [3] Apuntes de Ingeniería de Confiabilidad I, MGM 313, Raúl Stegmaier Bravo.
- [4] <https://ccm-eleva.cl/estandares-mineros/buscador/rutas/procesamiento-de-oxidos-de-cobre-hidrometalurgia-lx-sx-ew/>
- [5] <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/extraccion-por-solventes/>
- [6] Diagrama P&ID Planta Extracción por Solventes de Minera Centinela.
- [7] Diagrama P&ID Sistema Principal de Bombeo de Electrolito de Minera Centinela.
- [8] <https://rmesanalytics.com/>
- [9] Procesos de Mantenimiento de Activos, Antofagasta Minerals. Año 2022, página 9.