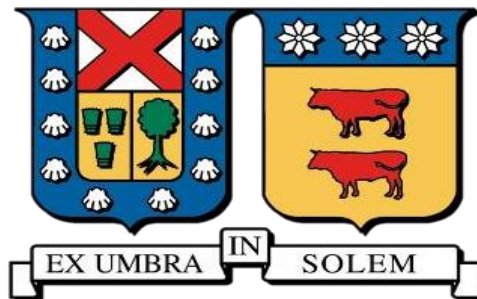


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO - CHILE**



“Proyecto de mejora en disponibilidad de puentes de cosecha de cátodos a partir del cambio de clips de barras de alimentación eléctrica en Área Húmeda, División Gabriela Mistral, Codelco”

Erwin Rute Luengo

TRABAJO EXAMEN PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

Profesor guía: Raul Stegmaier

Agosto 2026



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: Proyecto de mejora en disponibilidad de puentes de cosecha de cáttodos a partir del cambio de clips de barras de alimentación eléctrica en Área Húmeda, División Gabriela Mistral, Codelco

Nombre del candidato(a): Erwin Rute Luengo

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Stegmaier Bravo, 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):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 4-09-26 ; Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03/09/2026 ; Firma: _____

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

1.Introducción

En esta tesina, se describe el análisis de factibilidad y la implementación de un proyecto de mejora que consiste en reemplazar clips de sujeción de barras de alimentación eléctrica de dos puentes de cosecha de cátodos, por unos clips mejorados, con mayor resistencia a la abrasión y degradación química, esto en la Nave Electrowinning (EW) del Área Húmeda, de División Gabriela Mistral (DGM), Codelco. Originalmente, los clips utilizados eran de plástico (nylon), sin embargo, debido a la neblina ácida presente en la Nave EW, solo duraban un mes y medio, por lo que había fallas asociadas a la caída de las barras de alimentación, lo que se traducía en detenciones de los puentes de cosecha y por consiguiente, afectaba en la producción.

Debido a esta problemática, surgió la necesidad de identificar e implementar una alternativa de sujeción con mayor resistencia frente a las condiciones ambientales presentes en la Nave EW, permitiendo mitigar el modo de falla y mejorar la disponibilidad de los puentes de cosecha durante el período de evaluación. No obstante, antes de tomar esta decisión se procedió a realizar un análisis costo - beneficio de la mejora y gestionar la incorporación de los nuevos clips en faena. Posteriormente, se instaló la totalidad de los clips en la Nave EW y se realizó seguimiento a la captura de valor.

Contenido

1. Introducción.....	2
2. Descripción de la problemática.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
Alcance.....	5
Justificación.....	5
Descripción.....	5
3. Estado del Arte.....	6
3.1 Compatibilidad química de los materiales evaluados.....	8
3.2 Alternativas evaluadas.....	8
4. Metodología.....	11
4.1 Definir.....	12
4.2 Medir.....	14
4.3 Supuestos para la cuantificación de beneficios y captura de valor.....	16
4.4 Analizar.....	20
4.5 Mejorar.....	21
4.6 Controlar.....	22
5. Resultados obtenidos.....	23
5.1 Validación técnica.....	23
5.2 Implementación.....	25
5.3 Captura de valor.....	27
5.4 Resultados operacionales.....	28
5.5 Resultados económicos.....	29
6. Análisis y discusión de resultados.....	30
7. Conclusiones.....	33
8. Recomendaciones.....	34
9. Bibliografía.....	36
10. Anexo 1.....	37

2. Descripción de la problemática

Los puentes de cosecha de cátodos se alimentan eléctricamente por medio de barras de alimentación eléctrica las cuales son sujetadas por clips de plástico. Debido a la neblina ácida presente en la Nave Electrowinning, estos clips se degradan rápidamente lo que provoca la caída de dichas barras y, por lo tanto, la interrupción de la electricidad hacia los puentes de cosecha. Esto provoca la detención de los puentes de cosecha, afectando su disponibilidad operacional y la continuidad del proceso productivo.

Es por esto, que es necesario instalar clips de sujeción que tengan mejor resistencia a la abrasión y corrosión química con el fin que tengan mayor durabilidad y así mejorar la disponibilidad de los puentes y por consiguiente la producción de cátodos.

Objetivo General

Evaluar e implementar una mejora en el sistema de sujeción de barras de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos del Área Húmeda de DGM, mediante el reemplazo de clips de nylon por clips de polipropileno, con el fin de mitigar el modo de falla asociado a su degradación, mejorar la disponibilidad y cuantificar la captura de valor técnico-económica.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el modo de falla y evaluar su impacto en indisponibilidad, costos y riesgos operacionales mediante información histórica.
- Evaluar alternativas técnicas de clips de sujeción considerando resistencia al ambiente ácido, compatibilidad con el sistema existente y restricciones de implementación.
- Desarrollar un caso de negocio para comparar la situación base con la alternativa propuesta, considerando costos de repuestos, mano de obra y distintos escenarios de vida útil; y posteriormente evaluar los beneficios operacionales y económicos obtenidos tras la implementación.
- Planificar e implementar la prueba piloto y el reemplazo progresivo de los

clips.

- Medir la captura de valor posterior a la implementación y proponer acciones de control o mantenimiento para sostener la mejora.

Alcance

El alcance de este trabajo comprende la evaluación técnica, económica e implementación de una mejora en los clips de sujeción de las barras de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos ubicados en la Nave Electrowinning del Área Húmeda de División Gabriela Mistral. No se consideran modificaciones al sistema de alimentación eléctrica, a las barras de alimentación eléctrica ni a otros equipos asociados al proceso.

Justificación

La presente iniciativa surge de la necesidad de mejorar la disponibilidad de los puentes de cosecha de cátodos y reducir los costos asociados al reemplazo recurrente de los clips de sujeción de las barras de alimentación eléctrica. Las fallas observadas en estos componentes, producto de la degradación acelerada ocasionada por la neblina ácida presente en la Nave EW, generan indisponibilidad operacional, consumo de recursos de mantenimiento y riesgos asociados a intervenciones frecuentes. En este contexto, resulta pertinente evaluar alternativas que permitan aumentar la vida útil de los componentes y mejorar el desempeño operacional de los equipos. Lo anterior es consistente con los principios de gestión de activos, los cuales establecen que las organizaciones deben gestionar sus activos de forma que generen valor sostenible y alineado con los objetivos operacionales y económicos del negocio [1][2].

Descripción

La solución consiste en instalar clips de sujeción hechos de un material resistente a la neblina ácida presente en la Nave EW. Se realizó un análisis costo-beneficio y una evaluación del impacto sobre la disponibilidad con el propósito de determinar la viabilidad de la solución e implementar el reemplazo de los clips de sujeción de las barras de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos de la Nave EW del Área Húmeda.

3.Estado del Arte

El presente estado del arte tiene por objetivo identificar y evaluar las alternativas técnicas disponibles para mejorar la sujeción de las barras de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos que operan en ambientes expuestos a neblina ácida. Para ello se revisan las características del sistema actualmente instalado, los materiales utilizados en los clips de sujeción y las alternativas tecnológicas identificadas mediante revisión técnica y benchmarking con otras operaciones mineras.

Los puentes de cosecha de cátodos son alimentados eléctricamente por medio de carriles conductores unipolares aislados U25 marca Vahle. Este mismo fabricante ofrece otros tipos de sistemas de alimentación eléctrica, sin embargo, por diseño se utilizó el mencionado anteriormente.

En específico, el modelo U25 para aplicaciones interiores y exteriores es especialmente fácil de mantener porque se coloca individualmente. Gracias a los distintos materiales de los conductores, también es especialmente flexible y puede instalarse suspendido, lateral o vertical. También se pueden realizar vías curvas. Además, este modelo está disponible incluso en versión de alta temperatura y es adecuado para su uso en entornos con aire húmedo y salino [3].

Las características principales de este sistema son las siguientes:

- Es hasta 450 A, hasta 600 m/min, -30° C hasta +130° C
- Universal para montaje suspendido, lateral y vertical
- Alta seguridad gracias a una protección contra contactos directos IP23
- Calefactable para impedir la acumulación de hielo
- Se puede combinar con sistemas de transmisión de datos y de posicionado
- Aplicaciones: Grúas de estándar, para cargas pesadas, de proceso y pórtico, Transportadores de vagonetas, Transelevadores, Grúas eRTG-y STS, Atracciones, Torres de caída libre, Norias, Funiculares, etc.

Algunos componentes que conforman el sistema de alimentación eléctrica de los puentes son los siguientes, donde se destaca el clip de sujeción el cual fue reemplazado por una versión mejorada de mayor resistencia química:

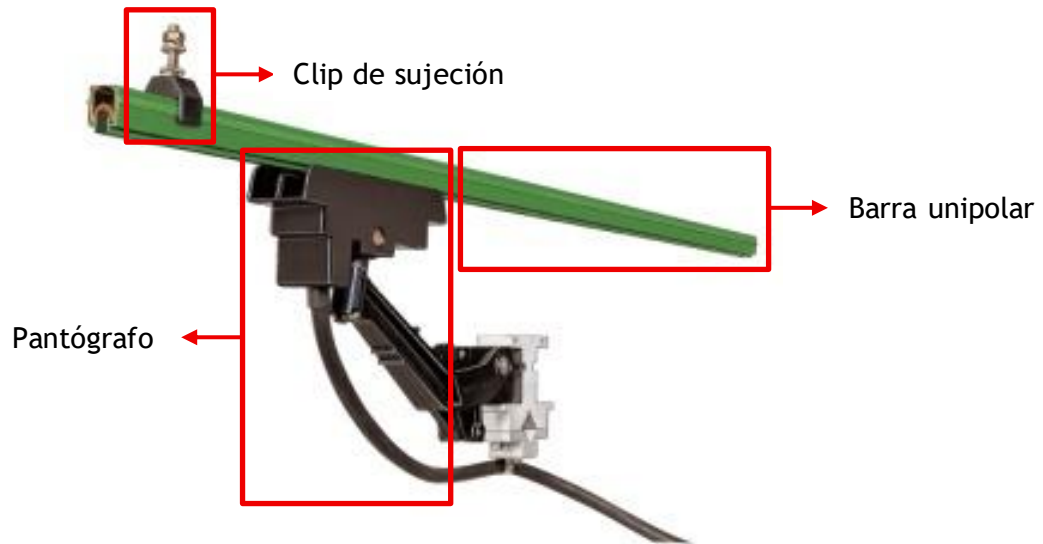


Ilustración 1. Componentes sistema de alimentación eléctrica Puentes de cosecha de cátodos



Ilustración 2. Sistema de alimentación eléctrica Puentes de cosecha de cátodos

3.1 Compatibilidad química de los materiales evaluados

La selección de materiales para componentes expuestos a ambientes corrosivos constituye un aspecto relevante para la confiabilidad y vida útil de los activos industriales. En aplicaciones sometidas a humedad, aerosoles y vapores ácidos, la compatibilidad química entre el material y el ambiente operativo influye directamente sobre el deterioro de sus propiedades mecánicas y funcionales.

Los clips originalmente instalados en la Nave Electrowinning estaban fabricados en poliamida (PA6 o nylon 6). Diversas referencias técnicas indican que las poliamidas pueden presentar degradación de propiedades mecánicas cuando son expuestas de manera prolongada a ambientes químicamente agresivos, especialmente en presencia de medios ácidos y humedad. Por su parte, el polipropileno es un polímero ampliamente utilizado en aplicaciones químicas e industriales debido a su elevada resistencia frente a soluciones y vapores corrosivos, incluyendo ambientes asociados al manejo de ácido sulfúrico [17][18].

Adicionalmente, antecedentes experimentales disponibles dentro de la organización evidencian que el polipropileno mantiene adecuadamente su integridad física bajo exposición a ácido sulfúrico concentrado, evidenciando compatibilidad del material con aplicaciones desarrolladas en ambientes asociados al manejo de este reactivo [19].

Estos antecedentes, junto con la literatura disponible sobre comportamiento de materiales poliméricos en ambientes corrosivos, proporcionaron la base técnica para evaluar el polipropileno como alternativa de reemplazo para los clips de sujeción utilizados en la Nave Electrowinning [17][18][19].

3.2 Alternativas evaluadas

Se analizaron tres alternativas principales:

Clip de sujeción de Nylon

Correspondían a la solución instalada originalmente por el fabricante. Sin embargo, la degradación observada en servicio evidenció una vida útil insuficiente para las condiciones ambientales presentes en la Nave EW.

Soportes de Carril⁽¹⁾

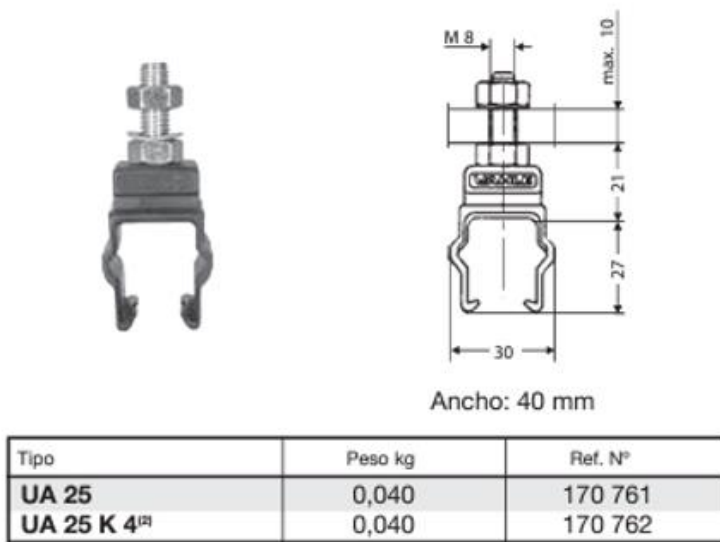


Ilustración 3. Clip de sujeción original

Clip de sujeción de Polipropileno

Al realizar un benchmark con otras empresas mineras que contasen con procesos de Electrowinning, se identificó que en División Radomiro Tomic (DRT) de Codelco se había instalado algunas unidades de clips mejorados de la misma marca, los cuales estaban en período de prueba, por lo que se procedió a realizar consultas técnicas tanto a la empresa Vahle como a DRT, con el fin de poder instalar unas unidades y someterlas a un período de prueba en la Nave EW de DGM. Cabe destacar que el clip mejorado es de tipo UIM25 en PP (polipropileno) y fijaciones de acero inoxidable. Esta alternativa ofrecía mayor resistencia química, compatibilidad total con el sistema existente y experiencia operacional previa en aplicaciones similares.

La utilización de benchmarking técnico constituye una práctica reconocida para identificar oportunidades de mejora y adoptar soluciones exitosas aplicadas en activos de características similares [15].



Ilustración 4. Clip de sujeción mejorado

Clip de sujeción de acero inoxidable

Por otro lado, también se exploró la opción de utilizar clips de acero inoxidable, sin embargo, su desventaja es que al estar contaminados por neblina y constante humedad propias de la Nave EW, se genera corto circuito entre la barra-clips-aislador y soporte de barras, provocando daño en las barras de alimentación eléctrica, debido a sobre calentamiento que se produce por la fuga de corriente, por lo que se desechó esta alternativa.



Ilustración 5. Clip de sujeción inoxidable

Otras alternativas

Por último, tampoco fue opción usar algún clip de otro fabricante, ya que se tendría que cambiar el conjunto completo de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha, lo cual aumentaba los costos considerablemente, esto por limitaciones dimensionales y estructurales. Tampoco fue opción cambiar el sistema de alimentación eléctrica de los puentes, debido a limitaciones de costos y por estar fuera del alcance del área de mantenimiento.

El análisis técnico permitió concluir que los clips de polipropileno constituían la alternativa más adecuada para la aplicación evaluada, debido a su compatibilidad con el sistema existente, su resistencia frente al ambiente químicamente agresivo y el menor riesgo operacional asociado a su implementación.

4. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se utilizó la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), ya que proporciona un enfoque estructurado para identificar el problema, cuantificar su impacto, evaluar alternativas de solución, implementar mejoras y asegurar su sostenibilidad en el tiempo. Esta metodología es ampliamente utilizada para la resolución de problemas y la mejora continua de procesos [4]. A continuación, se explica cada fase de esta metodología:

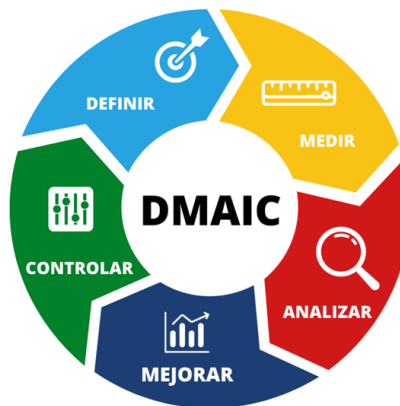


Ilustración 6. Metodología DMAIC

1. **Definir:** definir claramente el problema o la oportunidad de mejora
2. **Medir:** establecer el rendimiento de referencia del proceso mediante la

recopilación de datos.

3. **Analizar:** identificar las causas profundas de los problemas y las oportunidades de mejora.
4. **Mejorar:** desarrollar y aplicar soluciones para abordar los problemas detectados.
5. **Controlar:** establecer medidas de control para mantener las mejoras.

4.1 Definir

La problemática radica en la degradación acelerada de los clips de sujeción de las barras de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos de la Nave EW, producto de la exposición permanente a la neblina ácida presente en el ambiente operativo.

Como consecuencia, aproximadamente cada 1,5 meses los clips pierden su integridad mecánica, provocando la caída de las barras de alimentación eléctrica. Esta situación deja sin energía a los puentes de cosecha, generando indisponibilidad operacional y afectando la continuidad del proceso de cosecha de cátodos. Por lo tanto, el modo de falla definido para este estudio corresponde a:

“Pérdida de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha debido a la caída de las barras conductoras provocada por la degradación de los clips de sujeción.”

La correcta identificación y definición del modo de falla constituye una etapa fundamental dentro de los enfoques de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), ya que permite comprender las consecuencias funcionales de las fallas, priorizar los recursos de mantenimiento y orientar las acciones de mejora hacia aquellos eventos que generan mayor impacto sobre la disponibilidad, confiabilidad y creación de valor de los activos [6][7].

El proyecto busca reducir significativamente la ocurrencia de este modo de falla mediante la implementación de una solución de mayor resistencia química. Adicionalmente, la mitigación de este problema contribuye a:

- Reducir el riesgo de caída de barras de alimentación eléctrica.
- Mitigar fallas secundarias asociadas a quema de variadores de frecuencia de levante de viga.

- Disminuir intervenciones correctivas y preventivas relacionadas con el cambio de clips.
- Reducir costos de mantenimiento asociados a mano de obra y repuestos.
- Disminuir la exposición del personal a trabajos en altura.



Ilustración 7. Degradación clips originales

4.2 Medir

Una vez definido el problema, se cuantificó su impacto en la disponibilidad y en los costos operacionales. Para ello se obtuvo la información histórica de fallas registrada en el sistema SEP04 durante el año 2023, la cual es posteriormente contrastada con las órdenes de trabajo de SAP PM para validar los eventos asociados al modo de falla estudiado y determinar los recursos involucrados, tales como:

- Horas de supervisión.
- Horas de técnicos.
- Repuestos consumidos.
- Equipos de apoyo utilizados.



Estandarización Corporativa de
Sistemas de Registro y KPIs de
Gestión de Activos

Reporte Cumplimiento Imputaciones SEP 4



Ilustración 8. SEP4 y SAP PM

El análisis de la información (Anexo 1) permitió determinar que durante 2023 este modo de falla generó aproximadamente 32,6 horas de indisponibilidad.

Asimismo, se cuantificaron los costos asociados a:

- Pérdida de producción derivada de la indisponibilidad.
- Mano de obra empleada en intervenciones recurrentes.
- Reemplazo periódico de aproximadamente 1.520 clips cada 1,5 meses.

Un resumen de este costo total anual se muestra en la tabla 1.

	Clips originales
Horas de fallas (hrs.)	32,6
Costo por indisponibilidad (USD)	2.608.000

Tabla 1. Costo por indisponibilidad debido al modo de falla

Con el fin de establecer una línea base para evaluar el impacto de la mejora propuesta, se definieron indicadores de disponibilidad y confiabilidad operacional

asociados al modo de falla estudiado. Estos indicadores son ampliamente utilizados para evaluar el desempeño de confiabilidad de activos industriales y constituyen herramientas fundamentales para el análisis de mantenimiento y toma de decisiones basadas en desempeño [8].

Mejora en disponibilidad

La mejora potencial de disponibilidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta A = \frac{H_{ind}}{H_{cal}} \times 100$$

Donde:

- ΔA : incremento potencial de disponibilidad (%).
- H_{ind} : horas de indisponibilidad atribuibles al modo de falla.
- H_{cal} : horas calendario anuales de operación.

Entonces:

$$\begin{aligned}\Delta A &= \frac{32,6}{8760} \times 100 \\ \Delta A &= 0,3721\% \\ \Delta A &\approx 0,37\%\end{aligned}$$

Este indicador representa el incremento potencial de disponibilidad atribuible a la reducción del modo de falla analizado y no la disponibilidad global del sistema.

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)

El Tiempo Medio Entre Fallas representa el tiempo promedio de funcionamiento entre eventos de falla y se calcula mediante:

$$MTBF = \frac{T_{op}}{N_f}$$

Donde:

- T_{op} : tiempo efectivo de operación.
- N_f : número de fallas registradas.

Por tanto:

$$MTBF = \frac{8.727,4}{6}$$

$$MTBF = 1.454,6 \text{ h/falla}$$

Lo anterior indica que, en promedio, el modo de falla asociado a la degradación de los clips se presentaba cada **1.454,6 horas de operación**.

Tasa de falla (λ)

La tasa de falla se determina mediante:

$$\lambda = \frac{N_f}{T_{op}}$$

Por tanto:

$$\lambda = \frac{6}{8.727,4}$$

$$\lambda = 0,000688 \text{ fallas/h}$$

Este valor representa la frecuencia histórica de ocurrencia del modo de falla durante el período analizado.

4.3 Supuestos para la cuantificación de beneficios y captura de valor

Supuestos de disponibilidad y cálculo de indicadores de Confiabilidad

1. La operación de los puentes de cosecha se considera continua durante todo el año (24 horas al día, 365 días al año), equivalente a 8.760 horas calendario anuales.
2. Las 32,6 horas de indisponibilidad asociadas al modo de falla en estudio corresponden exclusivamente a eventos provocados por la degradación de los clips de sujeción y posterior caída de las barras de alimentación eléctrica, validadas mediante registros SEP04 y órdenes de trabajo SAP PM.
3. El tiempo efectivo de operación utilizado para el cálculo del MTBF de la condición base se obtiene descontando las horas de indisponibilidad de las horas calendario:

$$T_{op} = 8760 - 32,6$$

$$T_{op} = 8.727,4 \text{ h}$$

4. La recuperación de 0,37% de disponibilidad representa exclusivamente el efecto potencial de eliminar el modo de falla estudiado. Por tanto, no corresponde a la disponibilidad global de los puentes de cosecha ni incorpora otros modos de falla.
5. Se considera que la implementación de los clips mejorados controla significativamente el mecanismo de degradación estudiado. En consecuencia, las 32,6 horas históricas constituyen la referencia máxima anual de indisponibilidad potencialmente recuperable atribuible a dicho mecanismo.

Supuestos de costos evitados

1. El costo de mantenimiento asociado a la condición actual considera:
 - Repuestos utilizados para el reemplazo periódico de clips.
 - Mano de obra directa de supervisores y técnicos.
 - Recursos de apoyo empleados durante las intervenciones.
 - Frecuencia histórica de reemplazo de los clips originales.
2. Los precios unitarios de materiales y mano de obra corresponden a los valores vigentes durante el período de evaluación del proyecto.
3. Se asume que, sin la implementación de la mejora, la frecuencia de reemplazo de los clips de nylon habría permanecido constante durante el horizonte de evaluación.
4. No se consideran efectos inflacionarios, variaciones cambiarias ni modificaciones relevantes en los costos unitarios durante el período evaluado.
5. El ahorro de aproximadamente kUSD 226 por año corresponde a una estimación anualizada de la reducción de costos de repuestos y mano de obra, calculada a partir del desempeño observado y de una vida útil igual o superior a un año para los clips mejorados.

Supuestos de valorización de la disponibilidad recuperada

Para valorizar económicamente las horas de indisponibilidad se utiliza un costo

divisional de referencia de aproximadamente kUSD 80 por hora de indisponibilidad.

La valorización se calcula mediante la expresión:

$$B_p = H_r \times C_i$$

Donde:

- B_p : beneficio económico potencial.
- H_r : horas recuperadas.
- C_i : costo divisional por hora de indisponibilidad.

Por tanto:

$$B_p = 32,6 \times 80.000$$
$$B_p = USD\ 2.608.000/año$$

Este resultado corresponde a un beneficio económico potencial asociado a la capacidad productiva recuperada. No debe interpretarse automáticamente como un

ingreso contable efectivamente materializado, debido a que su captura puede depender de las condiciones productivas, restricciones del proceso y criterios económicos utilizados por la División.

El beneficio económico potencial por disponibilidad recuperada se presenta separadamente del ahorro directo de mantenimiento, para evitar su confusión o doble contabilización.

Supuestos de captura de valor

1. La captura de valor se compone de dos fuentes:

- Ahorros de mantenimiento (repuestos y mano de obra).
- Beneficio económico potencial asociado a la capacidad productiva recuperada mediante la reducción de la indisponibilidad.

2. La evaluación económica ex ante, desarrollada antes de la implementación, consideró principalmente los ahorros esperados de mantenimiento y distintos escenarios de vida útil, debido a que la duración real de los clips mejorados

todavía no había sido validada.

3. La evaluación económica ex post incorporó el desempeño observado después de la implementación, incluyendo la vida útil alcanzada, los eventos de falla registrados, las horas de indisponibilidad asociadas y la valorización potencial de la disponibilidad recuperada.
4. Los kUSD 226 por año y los MUSD 2,608 por año corresponden a categorías diferentes de beneficio y deben informarse por separado.

Supuestos de la prueba piloto

1. El comportamiento de los diez clips instalados en la prueba piloto se considera representativo para evaluar la factibilidad técnica de la implementación masiva.
2. Las condiciones ambientales del sector de la prueba piloto son equivalentes a las presentes en el resto de la Nave EW.
3. Durante el período de evaluación no existen cambios significativos en la operación que alteren la tasa de degradación del componente.

Indicador	Valor	Fuente / criterio
Horas calendario	8.760 h/año	Supuesto operacional
Número de fallas condición base	6 fallas/año	SEP04 y SAP PM
Indisponibilidad condición base	32,6 h/año	SEP04 y SAP PM
Incremento atribuible de disponibilidad	0,37%	Cálculo propio
MTBF condición base	1.455 h / falla	Cálculo propio
Tasa de falla (λ) condición base	0,000688 fallas/h	Cálculo propio
Clips considerados en el proyecto	1.520 unidades	Antecedentes del proyecto
Duración clip original	1,5 meses	Historial mantenimiento
Duración clip mejorado	> 1 año	Seguimiento operacional
Costo divisional de indisponibilidad	kUSD 80/h	Criterio económico divisional
Ahorro anualizado de mantenimiento	kUSD 226/año	Caso de negocio actualizado
Beneficio económico potencial por disponibilidad	MUSD 2,608/año	Cálculo propio

Tabla 2. Resumen de supuestos e indicadores

4.4 Analizar

Identificado el impacto del problema, se evaluaron alternativas que minimizaran el modo de falla. Cabe destacar que la selección de alternativas considerando criterios técnicos, operacionales y de riesgo es consistente con las prácticas recomendadas de gestión de activos para optimizar decisiones durante el ciclo de vida de los equipos [10][11]. A continuación, se presenta un resumen de éstas.

Criterio	Nylon	Polipropileno	Acero inoxidable
Resistencia química	Baja	Alta	Alta
Aislamiento eléctrico	Alto	Alto	Bajo
Compatibilidad con sistema existente	Total	Total	Parcial
Riesgo operacional	Alto	Bajo	Alto
Inversión requerida	Baja	Media	Media
Resultado	Inviabile	Seleccionada	Descartada

Tabla 3. Comparación de alternativas

Del análisis técnico realizado se concluye que la degradación prematura de los clips actuales se debe a su baja resistencia frente al ambiente químicamente agresivo existente en la nave EW. Como alternativa se identifica un clip fabricado en polipropileno de mayor resistencia a la abrasión química.

Antes de implementar la solución, se desarrolló un Análisis Costo-Beneficio (ACB) con el objetivo de determinar su viabilidad económica (tabla 4). La evaluación económica considera la comparación entre los costos de inversión y los beneficios esperados, siguiendo los principios clásicos de análisis económico utilizado en la evaluación de proyectos industriales [5][13][14]. Para ello se consideran los siguientes pasos:

1. Definición del alcance del proyecto.
2. Cuantificación de costos de inversión.
3. Estimación de beneficios esperados.
4. Comparación entre costos y beneficios.
5. Elaboración de recomendaciones.

El análisis se enfoca inicialmente en cuantificar la captura de valor asociada a:

- Reducción del consumo de repuestos.
- Disminución de costos de mano de obra.

Debido a la incertidumbre existente respecto de la duración real de los nuevos clips, no se incorpora inicialmente el beneficio asociado al aumento de disponibilidad.

	Clips actuales (1,5 meses)	Clips mejorados (hasta el momento con duración de 05 meses)	Clips mejorados (proyección de duración 01 año)	Clips mejorados (proyección de duración 14 meses)
N° de cambios al año (1520 clips)	8	2	1	1
Costo total HHs supervisor (USD)	70.247	21.074	8.781	7.526
Costo total HHs técnicos (USD)	200.008	60.002	25.001	21.429
Costo repuestos (USD)	78.189	211.949	88.312	75.696
Costo Total (USD)	348.444	293.025	122.094	104.652
Ahorro (USD) en 01 año en comparación a clips actuales		55.418	226.350	243.792

Tabla 4. Caso de negocio clips mejorados

Se evalúan distintos escenarios de vida útil de los clips mejorados, determinándose que la solución comienza a generar captura de valor cuando alcanza una duración mínima de cinco meses. Los resultados del caso de negocio demuestran que:

- Desde una vida útil de cinco meses se generan ahorros netos.
- A partir de catorce meses de duración también se obtienen ahorros en repuestos.
- La alternativa es económicamente viable y justifica avanzar hacia una prueba piloto.

Por último, se debe considerar que la evaluación económica desarrollada durante la etapa de análisis corresponde a una estimación ex ante, elaborada previo a la implementación de la solución. Debido a la incertidumbre existente respecto a la vida útil efectiva de los clips mejorados, en esta fase sólo se consideraron los beneficios asociados a la reducción de costos de mantenimiento. Una vez implementada la solución y validado su desempeño operacional, se realizó una evaluación ex post incorporando los beneficios derivados de la recuperación de disponibilidad y la mejora de la confiabilidad del sistema.

4.5 Mejorar

Con el fin de validar técnicamente la solución propuesta, se implementó una prueba piloto mediante la instalación de diez clips mejorados en el banco N° 2, filas 7, 9 y 20. Estos clips se trasladaron DRT a DGM y su instalación fue el 15 de abril de 2024.

Posteriormente se ejecutó un programa de inspecciones periódicas para evaluar:

- Integridad estructural.
- Grado de contaminación.
- Evidencia de degradación química.
- Condición de sujeción de las barras de alimentación.

La información obtenida mediante estas inspecciones fue utilizada para validar técnicamente la solución y respaldar la decisión de implementación masiva, cuyos resultados se presentan en el capítulo 5.

Una vez gestionada la codificación del material, el abastecimiento y la aprobación económica correspondiente, se ejecutó el reemplazo progresivo de la totalidad de los clips considerados en el proyecto.

4.6 Controlar

Una vez implementada la solución, se establecieron acciones de seguimiento y control con el propósito de asegurar la sostenibilidad de la mejora y prevenir la reaparición del modo de falla identificado. Esta etapa busca verificar que los beneficios obtenidos se mantengan en el tiempo y que los nuevos clips continúen cumpliendo adecuadamente su función bajo las condiciones ambientales de la Nave Electrowinning.

Para ello, se definió un plan de monitoreo basado en inspecciones periódicas de los clips de sujeción, las barras de alimentación eléctrica y sus elementos asociados. Estas inspecciones permiten evaluar el estado general de los componentes, identificar evidencias tempranas de degradación y detectar posibles desviaciones respecto de las condiciones esperadas de operación.

Adicionalmente, se mantiene el seguimiento de los eventos de falla registrados en los sistemas corporativos, con el objetivo de verificar la ausencia de recurrencia del modo de falla estudiado y evaluar el desempeño de la solución implementada en condiciones reales de operación.

Como complemento a lo anterior, se incorporó la solución dentro de las prácticas habituales de mantenimiento del activo, asegurando que las actividades de inspección, limpieza y conservación formen parte de la estrategia de mantenimiento de los puentes de cosecha. De esta manera, se resguarda la integridad del sistema de alimentación eléctrica y se favorece la continuidad operacional de los equipos. El seguimiento sistemático mediante indicadores de desempeño y actividades de mantenimiento constituye una práctica fundamental para asegurar la sostenibilidad de los beneficios obtenidos y gestionar eficazmente el desempeño de los activos físicos a lo largo de su ciclo de vida [9][10]. Asimismo,

estas actividades son consistentes con los principios de mantenimiento proactivo y mejora continua promovidos por Total Productive Maintenance (TPM) [16].

Plan de mantenimiento

Con el propósito de preservar la condición de las barras de alimentación eléctrica y de los clips de sujeción, se mantiene un programa de inspección y lavado con frecuencia cada cuatro semanas. Esta actividad consiste en la aplicación de un solvente dieléctrico especializado para remover contaminantes generados por la neblina ácida, siendo ejecutada por personal eléctrico de mantenimiento.

Este plan constituye el mecanismo de control permanente para asegurar la sostenibilidad de la mejora y la captura de valor obtenida.

5. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos permiten evaluar el desempeño técnico, operacional y económico de la solución implementada. En esta sección se presentan los principales hallazgos derivados de la prueba piloto, la implementación del proyecto y la cuantificación de los beneficios obtenidos respecto de la condición base.

5.1 Validación técnica

Como resultado de las actividades desarrolladas durante la etapa Mejorar de la metodología DMAIC, se realizó el seguimiento de los clips de polipropileno instalados durante la prueba piloto, con el objetivo de verificar su comportamiento bajo las condiciones reales de operación de la Nave Electrowinning.

El seguimiento se efectuó mediante inspecciones periódicas orientadas a evaluar la integridad estructural de los clips, el grado de contaminación superficial, la existencia de evidencias de degradación química y la condición de sujeción de las barras de alimentación eléctrica.

Como ejemplo de este proceso de seguimiento, la Ilustración 9 muestra una inspección realizada el 10 de junio de 2024. En dicha evaluación no se observaron evidencias de degradación del material, registrándose únicamente contaminación superficial susceptible de ser corregida mediante labores de mantenimiento.



Ilustración 9. Inspección 10 de junio 2024

Asimismo, la Ilustración 10 presenta una inspección efectuada en septiembre de 2025. En esta instancia tampoco se observaron evidencias de degradación del material, manteniéndose la sujeción de las barras sin alteraciones y verificándose una adecuada condición de sujeción.

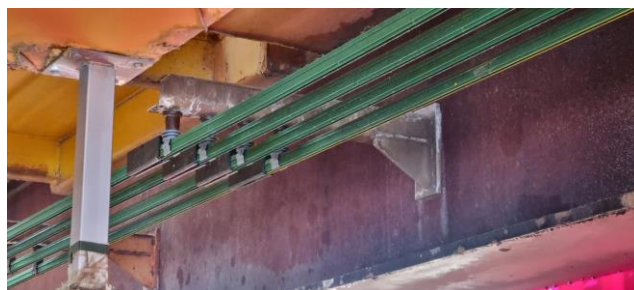


Ilustración 10. Inspección Septiembre de 2025

Las inspecciones realizadas durante 2024 y 2025 evidenciaron que los clips mejorados mantuvieron adecuadamente sus características mecánicas y funcionales, sin presentar degradación observable atribuible al ambiente corrosivo de la Nave EW. Si bien se observó contaminación superficial producto de las condiciones operacionales, ésta no afectó la capacidad de sujeción de las barras de alimentación eléctrica.

Asimismo, el seguimiento operacional permitió verificar una vida útil superior a cinco meses, valor que correspondía al umbral mínimo de factibilidad definido en el caso de negocio desarrollado durante la etapa de análisis. Posteriormente, el período de observación confirmó una duración superior a un año sin evidencias de deterioro significativo ni pérdida de funcionalidad.

Los resultados obtenidos permitieron validar técnicamente la alternativa de polipropileno para esta aplicación, demostrando una resistencia significativamente superior respecto de los clips de nylon originalmente utilizados. Adicionalmente, la ausencia de degradación observada durante el período evaluado permitió reducir la incertidumbre asociada a la solución propuesta y respaldó la decisión de avanzar hacia su implementación a escala completa.

La evidencia obtenida durante el seguimiento confirmó la factibilidad técnica de la alternativa evaluada y constituyó la base para justificar la adquisición e instalación masiva de los clips de polipropileno, cuya ejecución se presenta en la sección siguiente.

5.2 Implementación

Una vez validada técnicamente la alternativa mediante la prueba piloto y confirmado el cumplimiento de los criterios establecidos en el caso de negocio, se decidió avanzar con la implementación integral de la solución en los puentes de cosecha de cátodos de la Nave Electrowinning.

Para ello, se gestionó la codificación del material, la adquisición de los repuestos requeridos y las autorizaciones correspondientes para ejecutar el proyecto. La inversión total asociada a la implementación fue de aproximadamente kUSD 130, monto que fue presentado para aprobación mediante el proceso interno de evaluación y autorización de inversiones.

Paralelamente, se continuó realizando seguimiento a los clips instalados durante

la prueba piloto, con el propósito de verificar continuamente su desempeño bajo condiciones reales de operación. Los resultados obtenidos siguieron confirmando la ausencia de degradación observable y una vida útil significativamente superior a la de los clips originalmente utilizados.

Debido a que el plazo de suministro de los clips mejorados era de aproximadamente tres meses, se desarrolló un programa de implementación progresiva para coordinar la recepción de materiales y las actividades de reemplazo, minimizando los impactos sobre la operación.

La Ilustración 11 presenta el calendario de instalación utilizado para ejecutar el reemplazo gradual de la totalidad de los 1.520 clips considerados dentro del alcance del proyecto.

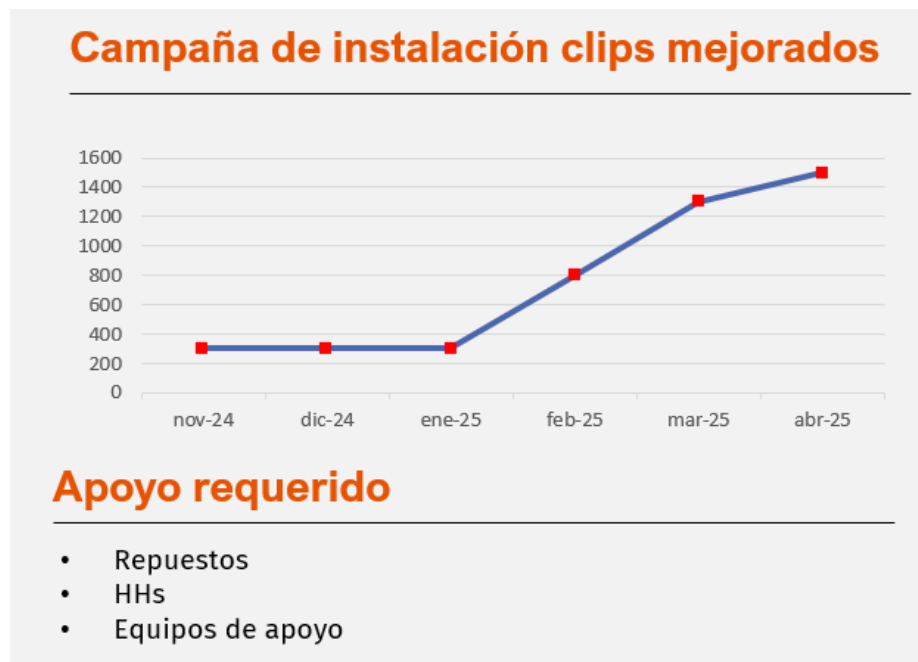


Ilustración 11. Calendario de instalación de clips mejorados

La implementación se desarrolló conforme a la planificación establecida y finalizó en abril de 2025, completando el reemplazo de la totalidad de los clips originales de nylon por clips de polipropileno de mayor resistencia química.

La ejecución del proyecto permitió reemplazar los componentes originalmente asociados al mecanismo de degradación identificado, estableciendo las condiciones necesarias para mejorar el desempeño del sistema y materializar los beneficios operacionales y económicos observados posteriormente.

5.3 Captura de valor

Una vez completada la implementación de los clips de polipropileno y verificado su desempeño bajo condiciones reales de operación, fue posible cuantificar la captura de valor generada por el proyecto. Los resultados obtenidos evidenciaron beneficios superiores a los estimados inicialmente durante el caso de negocio desarrollado en la etapa de análisis.

La evaluación económica preliminar se sustentó principalmente en la reducción esperada de costos de mantenimiento, debido a la incertidumbre existente respecto de la vida útil efectiva de los clips mejorados. Sin embargo, el seguimiento posterior permitió validar una duración significativamente superior a la condición base, reduciendo sustancialmente la frecuencia de reemplazo de componentes y las intervenciones asociadas.

Como consecuencia, se observaron reducciones relevantes en el consumo de repuestos, en las horas de trabajo destinadas a actividades de reemplazo y en los recursos asociados a la ejecución de estas intervenciones. Considerando una duración superior a un año para los clips mejorados, la captura de valor asociada a la disminución de costos de mantenimiento alcanzó aproximadamente **kUSD 226 anuales**.

Adicionalmente, la solución permitió reducir significativamente la ocurrencia de intervenciones correctivas recurrentes asociadas a la caída de barras de alimentación eléctrica, reduciendo la carga de trabajo no planificada y disminuyendo la exposición del personal a actividades de mantenimiento en altura.

Los resultados obtenidos permitieron además contrastar las hipótesis planteadas durante la evaluación económica ex ante con el desempeño real observado tras la implementación. Inicialmente, el caso de negocio se sustentó principalmente en los ahorros esperados por concepto de reducción de costos de mantenimiento. Sin embargo, la evaluación ex post demostró que la solución no solo cumplió las expectativas iniciales, sino que además generó beneficios operacionales adicionales derivados de una mejora significativa del desempeño del sistema.

En este contexto, la captura de valor obtenida constituye el primer nivel de beneficios económicos directamente verificables del proyecto. Los efectos asociados a la mejora de disponibilidad, confiabilidad y continuidad operacional se presentan en las secciones siguientes.

5.4 Resultados operacionales

Una vez finalizada la implementación de los clips de polipropileno y transcurrido el correspondiente período de seguimiento operacional, se evaluó el efecto de la mejora sobre el desempeño del sistema de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos.

Los resultados obtenidos evidenciaron una mejora significativa respecto de la condición base analizada durante la etapa de medición. Desde la finalización de la implementación no se registraron nuevos eventos asociados al modo de falla correspondiente a la pérdida de alimentación eléctrica ocasionada por la caída de las barras conductoras debido a la degradación de los clips de sujeción.

Como consecuencia, durante el período evaluado no se registraron horas de indisponibilidad asociadas a este modo de falla, permitiendo recuperar las 32,6 horas anuales de indisponibilidad identificadas en la condición base. Esto equivale a un incremento atribuible de aproximadamente 0,37% de disponibilidad asociado al modo de falla estudiado.

Desde la perspectiva de confiabilidad, el análisis histórico realizado para el año 2023 permitió identificar seis eventos asociados a este modo de falla, con un Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de aproximadamente 1.455 h/falla y una tasa de falla de 0,000688 fallas por hora de operación. Posteriormente, durante el período de seguimiento considerado en este estudio, no se registraron nuevos eventos asociados a la degradación de los clips, evidenciando una mejora sustancial respecto de la línea base establecida.

En consecuencia, durante el período evaluado, el tiempo acumulado de operación sin fallas superó ampliamente el MTBF histórico de la condición base. Estos resultados demuestran una mejora importante de la confiabilidad funcional del sistema de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha y de su capacidad para mantener la continuidad operacional.

Adicionalmente, se observó una disminución significativa de los riesgos operacionales asociados al modo de falla estudiado, al no registrarse eventos de caída de barras de alimentación eléctrica durante el período de evaluación. Asimismo, se redujo la probabilidad de ocurrencia de fallas secundarias relacionadas con componentes eléctricos asociados, contribuyendo a mejorar la estabilidad operativa del proceso.

Los principales indicadores operacionales y de confiabilidad obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Indicador	Situación base (2023)	Situación posterior a implementación
Número de fallas	6 fallas/año	0 eventos registrados*
Horas de indisponibilidad	32,6 h/año	0 h registradas*
Incremento atribuible de disponibilidad	No aplica	+0,37 %
MTBF	1.455 h / falla	Superior al período de observación sin fallas*
Tasa de falla (λ)	0,000688 fallas/h	0 fallas/h observadas
Caída de barras por degradación de clips	Riesgo presente	Sin eventos registrados

Tabla 5. Indicadores operacionales y de confiabilidad

*Durante el período evaluado posterior a la implementación.

Los resultados obtenidos evidencian que la sustitución de los clips originales permitió controlar eficazmente el mecanismo de deterioro que originaba el modo de falla estudiado, mejorando la disponibilidad, la confiabilidad y la continuidad operacional de los puentes de cosecha de cátodos. Esto es consistente con los indicadores recomendados para la evaluación de activos industriales críticos [8].

5.5 Resultados económicos

Los resultados económicos del proyecto se analizaron distinguiendo dos categorías de beneficio: los ahorros directos o anualizados de mantenimiento y el beneficio económico potencial asociado a la capacidad productiva recuperada.

La primera categoría corresponde a la reducción del consumo de repuestos y de las horas de trabajo requeridas para el reemplazo periódico de los clips. Como se presentó en la sección 5.3, este ahorro fue estimado en aproximadamente **kUSD 226 por año**, considerando el desempeño observado y una vida útil igual o superior a un año para los clips mejorados.

La segunda categoría corresponde a la valorización económica potencial de la disponibilidad recuperada. La condición base presentó 32,6 horas anuales de indisponibilidad atribuibles al modo de falla estudiado. Para su valorización se utilizó el criterio económico divisional de aproximadamente **kUSD 80 por hora de indisponibilidad**.

Por tanto:

$$B_{\text{disponibilidad}} = 32,6 \text{ h/año} \times 80 \text{ kUSD/h}$$

$$B_{\text{disponibilidad}} = 2,608 \text{ MUSD/año}$$

En consecuencia, el beneficio económico potencial asociado a la capacidad productiva recuperada se estimó en aproximadamente **MUSD 2,608 anuales**. Este beneficio debe interpretarse separadamente del ahorro anualizado de mantenimiento. Mientras los kUSD 226 corresponden a la reducción estimada de costos de repuestos y mano de obra, los MUSD 2,608 representan la valorización potencial de las horas de indisponibilidad evitadas utilizando el criterio económico divisional.

La inversión requerida para implementar la solución fue de aproximadamente kUSD 130. La comparación entre esta inversión y los beneficios obtenidos evidencia la conveniencia económica de la solución. No obstante, para mantener una interpretación conservadora, no se presenta como beneficio contable total la suma automática de ambas categorías, debido a que la captura efectiva del beneficio productivo depende de las condiciones reales de operación y de la ausencia de restricciones adicionales en el proceso.

Concepto	Resultado	Clasificación
Inversión de implementación	kUSD 130	Inversión inicial
Ahorro de repuestos y mano de obra	kUSD 226/año	Ahorro anualizado de mantenimiento
Horas de indisponibilidad potencialmente recuperadas	32,6 h/año	Resultado operacional
Incremento atribuible de disponibilidad	0,37%	Resultado operacional
Costo divisional de indisponibilidad	kUSD 80/h	Criterio de valorización
Beneficio económico por capacidad recuperada	MUSD 2,608/año	Beneficio económico potencial

Tabla 6. Resultados económicos obtenidos a partir del proyecto

Nota: El ahorro de mantenimiento y el beneficio asociado a la disponibilidad corresponden a categorías diferentes. El primero representa la reducción anualizada de costos de mantenimiento, mientras que el segundo corresponde a una valorización potencial de la capacidad productiva recuperada.

6. Análisis y discusión de resultados

Los resultados obtenidos permiten concluir que la implementación de clips de polipropileno para la sujeción de las barras de alimentación eléctrica constituye una solución efectiva para controlar el modo de falla asociado a la degradación

acelerada de los clips originales en la Nave Electrowinning.

Desde el punto de vista técnico, la validación realizada durante la prueba piloto permitió confirmar que el material seleccionado posee una resistencia significativamente superior frente a las condiciones de exposición presentes en la Nave EW. Mientras los clips de nylon presentaban una degradación acelerada producto del ambiente químicamente agresivo, los clips de polipropileno mantuvieron su integridad estructural y funcional durante todo el período de observación. Estos resultados permiten concluir que el problema no se encontraba asociado al diseño del sistema de alimentación eléctrica, sino principalmente a la incompatibilidad del material originalmente utilizado con las condiciones reales de operación.

La validación técnica obtenida durante el seguimiento fue particularmente relevante para disminuir la incertidumbre existente en la evaluación inicial del proyecto. En efecto, la solución fue sometida primero a una prueba piloto bajo condiciones reales antes de avanzar hacia una implementación masiva, permitiendo fundamentar la toma de decisiones mediante evidencia operacional y reduciendo el riesgo asociado a la inversión requerida.

Desde la perspectiva metodológica, los resultados obtenidos validan el uso de DMAIC como herramienta para abordar problemas de confiabilidad y desempeño de activos. La secuencia estructurada de definir el problema, medir su impacto, analizar alternativas, implementar una solución y controlar su desempeño permitió vincular la toma de decisiones técnicas con resultados operacionales y económicos verificables. Asimismo, el uso de información histórica proveniente de registros operacionales y de mantenimiento permitió respaldar objetivamente cada etapa del análisis.

El análisis económico también permitió distinguir dos categorías de evaluación. La evaluación ex ante fue desarrollada antes de la implementación y se sustentó principalmente en los ahorros esperados de mantenimiento y en escenarios de vida útil, debido a que la duración efectiva de los clips mejorados aún era desconocida. Posteriormente, la evaluación ex post permitió contrastar esas hipótesis con el desempeño observado e incorporar la valorización potencial de la disponibilidad recuperada.

El ahorro directo o anualizado de mantenimiento se estimó en aproximadamente kUSD 226 por año, como consecuencia de la disminución del consumo de repuestos y de las horas de trabajo requeridas para las intervenciones. Este beneficio representa una captura de valor asociada directamente a la gestión de mantenimiento.

Por otra parte, la recuperación potencial de 32,6 horas de indisponibilidad representa un incremento aproximado de 0,37% de disponibilidad anual atribuible exclusivamente al modo de falla estudiado. La precisión de esta expresión es importante, puesto que el indicador no corresponde a la disponibilidad global de los puentes de cosecha, sino al efecto específico de controlar una fuente de indisponibilidad.

Aplicando el criterio económico divisional de aproximadamente kUSD 80 por hora, las 32,6 horas potencialmente recuperadas representan un beneficio económico estimado de MUSD 2,608 por año. Este resultado evidencia que el mayor impacto económico potencial del proyecto proviene de la capacidad productiva recuperada y no solamente de la reducción de los costos de mantenimiento.

Sin embargo, ambas categorías de beneficio deben interpretarse separadamente. Los kUSD 226 por año corresponden a un ahorro de mantenimiento anualizado, mientras que los MUSD 2,608 por año representan una valorización económica potencial de la disponibilidad recuperada. Esta diferenciación evita presentar como equivalentes un costo directamente evitable y un beneficio productivo cuya materialización puede depender de la capacidad del proceso para transformar las horas disponibles en producción efectiva.

Desde la perspectiva de confiabilidad, la comparación con la condición base evidencia una mejora sustancial. Durante 2023 se registraron seis eventos, un MTBF de aproximadamente 1.455 horas y una tasa de falla de 0,000688 fallas por hora. En el periodo posterior considerado no se observaron nuevos eventos asociados al modo de falla estudiado. No obstante, el MTBF posterior debe interpretarse como superior al tiempo acumulado de observación sin fallas y no como un valor definitivo.

La mejora también permitió disminuir las intervenciones recurrentes y la exposición del personal a actividades en altura. Aunque estos efectos no fueron valorizados económicamente en el estudio, constituyen beneficios adicionales desde la perspectiva de seguridad, utilización de recursos y continuidad operacional.

En términos de gestión de activos, el proyecto demuestra que una intervención focalizada sobre un componente de bajo costo relativo puede generar efectos significativos cuando dicho componente influye en la continuidad de un activo crítico. La integración de información histórica, análisis de confiabilidad, prueba piloto y evaluación económica permitió orientar la inversión hacia una alternativa alineada con el desempeño, el costo y el riesgo del activo.

Finalmente, los resultados muestran la importancia de mantener una evaluación

continúa. La ausencia de fallas durante el periodo observado constituye evidencia favorable, pero no demuestra que la tasa futura de falla sea permanentemente igual a cero. Por ello, la sostenibilidad de la mejora debe comprobarse mediante el seguimiento de indicadores, las inspecciones periódicas y la actualización de los registros de mantenimiento.

7. Conclusiones

1. El análisis de la información histórica permitió identificar que la degradación acelerada de los clips de nylon constituía el origen del modo de falla asociado a la pérdida de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos. Durante 2023 se registraron seis eventos atribuibles a este mecanismo, los que acumularon 32,6 horas de indisponibilidad y evidenciaron su impacto sobre la continuidad operacional, los costos de mantenimiento y los riesgos asociados a la operación. La condición base obtenida permitió establecer una línea de referencia objetiva para la evaluación técnica y económica de la mejora propuesta.
2. La evaluación de alternativas permitió determinar que los clips de polipropileno representaban la solución más adecuada para las condiciones ambientales presentes en la Nave Electrowinning, debido a su resistencia frente al ambiente químicamente agresivo, su compatibilidad con el sistema existente y el menor riesgo operacional asociado a su implementación. Asimismo, el benchmark realizado con otras operaciones permitió respaldar técnicamente la selección de la alternativa propuesta.
3. La evaluación económica desarrollada durante la etapa de análisis permitió justificar técnicamente la conveniencia de avanzar hacia una prueba piloto. Dado que la duración efectiva de los clips mejorados era inicialmente desconocida, la evaluación ex ante se sustentó principalmente en los ahorros potenciales de mantenimiento asociados a repuestos y mano de obra. Posteriormente, la evaluación ex post permitió contrastar dichas hipótesis con el desempeño real observado, validando la conveniencia económica de la solución implementada.
4. La prueba piloto permitió verificar el comportamiento de los clips de polipropileno bajo condiciones reales de operación, observándose una vida útil superior al umbral mínimo definido en el caso de negocio y ausencia de degradación observable durante el periodo evaluado. Estos resultados entregaron la evidencia necesaria para respaldar la implementación masiva de

la solución y reducir la incertidumbre asociada a la inversión requerida.

5. Durante el período de seguimiento posterior a la implementación no se registraron recurrencias asociadas al modo de falla estudiado. Asimismo, el tiempo de operación sin fallas superó el MTBF histórico observado en la condición base, evidenciando una mejora significativa del desempeño funcional del sistema. Desde el punto de vista económico, se estimó una captura de valor anualizada de aproximadamente kUSD 226 por concepto de ahorro en mantenimiento. Adicionalmente, la recuperación potencial de 32,6 horas anuales de indisponibilidad equivale a un incremento atribuible de aproximadamente 0,37% de disponibilidad atribuibles al modo de falla estudiado y a un beneficio económico potencial estimado de MUSD 2,608 por año, utilizando el criterio divisional de valorización de indisponibilidad.
6. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de la metodología DMAIC constituyó un marco adecuado para abordar la problemática estudiada, permitiendo vincular el análisis técnico, la evaluación económica y la gestión de activos dentro de un mismo proceso de toma de decisiones. Asimismo, la incorporación de actividades de monitoreo, inspección y seguimiento de indicadores proporciona las condiciones necesarias para verificar la sostenibilidad de la mejora en el tiempo y continuar validando su desempeño operacional mediante evidencia objetiva.

8. Recomendaciones

1. Mantener los clips de polipropileno como estándar técnico para futuras reposiciones del sistema de alimentación eléctrica de los puentes de cosecha de cátodos de la Nave Electrowinning, considerando el desempeño observado durante el período de seguimiento y su compatibilidad con las condiciones operacionales del proceso.
2. Mantener el programa de inspecciones periódicas de las barras de alimentación eléctrica y sus elementos de sujeción, con el propósito de verificar la condición de los componentes, identificar oportunamente eventuales mecanismos de deterioro y asegurar la sostenibilidad de los beneficios obtenidos.
3. Continuar ejecutando el programa de lavado de barras de alimentación eléctrica y clips de sujeción, utilizando las prácticas actualmente definidas para controlar la acumulación de contaminantes generados por la neblina ácida y preservar las condiciones de operación del sistema.

4. Mantener el seguimiento periódico de indicadores de desempeño, tales como número de fallas, horas de indisponibilidad, disponibilidad, MTBF, tasa de falla, costos de mantenimiento y consumo de repuestos, con el fin de verificar la permanencia de los beneficios obtenidos y apoyar la toma de decisiones basada en datos.
5. Incorporar formalmente los clips de polipropileno en la documentación técnica y de mantenimiento de la División, incluyendo listas de materiales, planes de mantenimiento, catálogos de repuestos y estrategias de reposición, con el propósito de asegurar la continuidad de la solución implementada.
6. Aplicar metodologías similares de análisis técnico-económico en otros activos expuestos a ambientes corrosivos, especialmente en sistemas que utilicen componentes poliméricos o materiales susceptibles a degradación química acelerada. La experiencia desarrollada demuestra que pequeñas modificaciones en componentes de bajo costo relativo pueden generar beneficios relevantes sobre la confiabilidad y disponibilidad de activos críticos.
7. Complementar futuras evaluaciones mediante metodologías de Costo de Ciclo de Vida (LCC) y análisis de riesgos, con el fin de incorporar de forma más explícita los efectos de las fallas sobre la disponibilidad, la producción, la seguridad y los costos totales asociados al ciclo de vida de los activos.
8. Promover la utilización de pruebas piloto controladas como etapa previa a inversiones de mayor escala, especialmente en iniciativas de confiabilidad y mantenimiento donde existan incertidumbres respecto del desempeño de nuevas soluciones. Este enfoque permite validar hipótesis técnicas y económicas en condiciones reales de operación antes de comprometer recursos significativos.
9. Fortalecer la integración entre gestión de activos, confiabilidad y evaluación económica en la priorización de proyectos de mantenimiento, de modo que futuras inversiones consideren no solo los costos directos de intervención, sino también los beneficios asociados a la disponibilidad, continuidad operacional y creación de valor para la organización.

9. Bibliografía

- [1] International Organization for Standardization. (2014). [ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology](#). Geneva, Switzerland: ISO.
- [2] International Organization for Standardization. (2024). [ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements](#). Geneva, Switzerland: ISO.
- [3] VAHLE GmbH & Co. KG. (s.f.). [Insulated conductor systems U15, U25 and U35](#).
- [4] Socconini, L. (2023). [Explicación de la metodología DMAIC de Lean Six Sigma](#). Lean Six Sigma Institute.
- [5] Stobierski, T. (2019). [What is cost-benefit analysis and how to do it](#). Harvard Business School Online.
- [6] Moubray, J. (1997). [Reliability-centered maintenance \(RCM II\)](#) (2nd ed.). Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- [7] Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). RCM: Gateway to world class maintenance. Oxford, United Kingdom: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [8] Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). [Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications](#) (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [9] Kelly, A. (2006). Maintenance systems and documentation. Oxford, United Kingdom: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [10] Campbell, J. D., Jardine, A. K. S., & McGlynn, J. (2016). [Asset management excellence: Optimizing equipment life-cycle decisions](#) (4th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [11] Hastings, N. A. J. (2021). *Physical asset management: With an introduction to the ISO 55000 series of standards*. Cham, Switzerland: Springer.
- [12] Barringer, H. P., & Weber, D. P. (1996). [Life cycle cost tutorial](#). International Conference of Maintenance Societies.
- [13] Sullivan, W. G., Wicks, E. M., & Koelling, C. P. (2018). [Engineering economy](#) (17th ed.). New York, NY: Pearson.
- [14] Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). [Systems engineering and analysis](#) (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- [15] Wireman, T. (2014). [Benchmarking best practices for maintenance, reliability and asset management](#). New York, NY: Industrial Press.

[16] Nakajima, S. (1988). [Introduction to TPM: Total productive maintenance](#). Portland, OR: Productivity Press.

[17] Brydson, J. A. (1999). *Plastics Materials* (7th ed.). Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.

[18] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

[19] ECOMETALES. (2021). *Instructivo pruebas de compatibilidad de materiales. Código GDN-04PPI-INS GS-00018, Revisión 1*. Chile: ECOMETALES.

10. Anexo 1

El Anexo 1 presenta los eventos registrados en SEP04 y validados mediante SAP PM que fueron utilizados para la construcción de la línea base de indisponibilidad y confiabilidad del sistema.

Orden	Descripción	Duración	Unidad	Cantidad de trabajadores	HHs
106235142	sch,cambio barras sector pasillo,bco4	4,0	Hrs	4	16,0
106282372	CAMBIO DE BARRAS UNIPOLARES BANCO 3	6,0	Hrs	4	24,0
106282372	CAMBIO DE BARRAS UNIPOLARES BANCO 3	1,0	Hrs	2	2,0
106282372	CAMBIO DE BARRAS UNIPOLARES BANCO 3	1,0	Hrs	2	2,0
106959963	INTERVENCION BARRAS UNIPOLARES	2,0	Hrs	2	4,0
106959963	INTERVENCION BARRAS UNIPOLARES	0,5	Hrs	2	1,0
106959963	INTERVENCION BARRAS UNIPOLARES	0,1	Hrs	1	0,1
107289795	Cambio de tramo barra unipolar Banc 2	6,0	Hrs	2	12,0
107289795	Cambio de tramo barra unipolar Banc 2	3,0	Hrs	2	6,0
107289795	Cambio de tramo barra unipolar Banc 2	1,0	Hrs	1	1,0
107426295	Schw: Cambio de Clips Banco 3	1,0	Hrs	2	2,0
107426295	Schw: Cambio de Clips Banco 3	1,0	Hrs	2	2,0
107560814	sch,cambio aisladores,clips barras unip	5,0	Hrs	3	15,0
107560814	sch,cambio aisladores,clips barras unip	1,0	Hrs	2	2,0
	NºHrs de falla año 2023	32,6			

Ilustración 12. Fallas ocurridas en año 2023 debido al modo de falla en estudio