

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

**PROPUESTA DE MEJORA EN LA GESTION DE MANTENIMIENTO A
UNA PLANTA PROCESADORA DE ALGAS APLICANDO METODOLOGIA DE
ANALISIS CAUSA-RAIZ**

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

Alumno:

Tomás Eduardo Mardones Olivares

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González



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 MEJORA EN LA GESTION DE MANTENIMIENTO A UNA PLANTA PROCESADORA DE ALGAS APLICANDO METODOLOGIA DE ANALISIS CAUSA-RAIZ

Nombre del candidato(a): Tomás Eduardo Mardones Olivares

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Viña del Mar ; **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Baldi González, 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: 28/07/2025 ; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23/07/2025 ; **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.

RESUMEN

Esta tesis propone un plan de mejora integral en la gestión del mantenimiento en el área de prensado de una planta procesadora de algas ubicada en La Calera, especializada en la producción de agar. A través del diagnóstico en terreno y la aplicación de la metodología de Análisis Causa-Raíz (ACR), se identificaron dos problemáticas prioritarias: la corrosión estructural de componentes críticos y el deterioro prematuro del aceite hidráulico. Estas condiciones, que generan entre 12 y 37 fallas anuales, afectan tanto la confiabilidad operativa como la seguridad del personal.

Se formularon soluciones técnicas y de gestión, tales como la implementación de un sistema de enfriamiento del aceite hidráulico, el reforzamiento estructural con perfiles de mayor durabilidad, la creación de protocolos post-intervención y un plan de mantenimiento preventivo estructurado. La evaluación técnica y económica estima reducciones del 40 al 60 % en la frecuencia de fallas por problemática, mejoras en la disponibilidad y mantenibilidad, así como una relación beneficio/costo favorable. Los resultados permiten concluir que las mejoras son técnica y económicamente viables, y ofrecen una oportunidad concreta para avanzar hacia una cultura de mantenimiento más proactiva y eficiente en la organización.

KEYWORDS:

Mantenimiento Industrial

Análisis causa-raíz

Confiabilidad

Agar -agar

Evaluación económica

Gestión de activos

Riesgo total Anualizado

Seguridad laboral

ÍNDICE

RESUMEN	2
ÍNDICE	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	4
INDICE DE GRAFICOS	5
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	6
INTRODUCCIÓN	0
OBJETIVO GENERAL	1
OBJETIVO ESPECÍFICO	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	2
1 ANTECEDENTES GENERALES	3
1.1 CONTEXTO OPERACIONAL	3
1.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE PRODUCCION DE AGAR	4
1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL	5
1.4 LAYOUT PRENSA	6
1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	6
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍAS	11
2 METODOLOGIAS	12
2.1 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	12
2.2 METODOLOGIA DE ANALISIS CAUSA RAIZ	12
2.3 APLICACIÓN DE METODOLOGIA ANALISIS CAUSA RAIZ	16
2.4 PROPUESTAS DE SOLUCIONES	31
CAPÍTULO 3: EVALUACION TÉCNCA Y ECONÓMICA	35
3 EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA	36
3.1 EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA	36
3.2 EFECTIVIDAD DE LAS SOLUCIONES	43
CONCLUSIÓN	45
BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación de la planta; La Calera, Artificio Fuente: Google Maps 3

Figura 1-2. Modelo de Prensa, Fuente: Rolando Cavieres 6

Figura 1-3. Estructura de Prensa Corroída, Fuente: Elaboración Propia, Visitas a terreno 7

Figura 1-4. Tapa de Prensa, Fuente: Elaboración Propia, Visita a terreno 8

Figura 1-5. Pérdida de producto en Prensado, Fuente: Elaboración propia, Visita a terreno 10

Figura 2-1. Diagrama de Ishikawa 16

Figura 2-2. Matriz Cuantitativa de Riesgo, Estructuras y equipamiento 21

Figura 2-3. Modos de falla para la realización de ACR, Estructuras y Equipamiento21

Figura 2-4. Árbol de fallas e hipótesis, Estructuras y Equipamiento 22

Figura 2-5. Tabla de Causas Raíz, Estructuras y Equipamiento 24

Figura 2-6. Matriz Cuantitativa de Riesgo, Sistema hidráulico 26

Figura 2-7. Modos de falla para la realización de ACR, Sistema hidráulico 27

Figura 2-8. Árbol de fallas e hipótesis, Sistema hidráulico.....27

Figura 2-9. Tabla de Causas Raíz, Sistema hidráulico.....30

Figura 3-1. Costos estimados de implementación de un plan de mantenimiento preventivo 36

Figura 3-2. Costos estimados de reemplazo de perfiles estructurales 37

Figura 3-3. Costos estimados de refuerzos de soldadura y puntos críticos 38

Figura 3-4. Costos estimados de implementación de un sistema de enfriamiento 39

Figura 3-5. Costos estimados de capacitación del personal para el almacenamiento de aceite 40

Figura 3-6. Costos estimados de implementación de un plan de mantenimiento de circuito hidráulico 41

Figura 3-7. Costos estimados de creación de protocolos post-intervención 42

Figura 3-8. Escenario futuro estimado, Problemática de Corrosión en las estructuras y equipamiento 43

Figura 3-9. Escenario futuro estimado, Problemática de Deterioro prematuro de componentes y aceite hidráulico 44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Evaluación de Frecuencia de Fallos..... 17

Tabla 2-2. Escala de Evaluación para Impacto, Seguridad y Producción 18

Tabla 2-3. Matriz de criticidad 18

Tabla 2-4. Costos asociados e Intervención en estructuras del área de prensado 19

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1-1. Ciclo de trabajo de una Prensa, Fuente: Elaboración Propia 9

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

MTTR	: Mean Time to Repair (Tiempo medio de reparación)
RTA	: Coste Anual de Reparación
ACR	: Análisis Causa Raíz
FF	: Frecuencia de Falla
KPI	: Key Performance Indicator: (Indicador Clave de Desempeño)
PAF	: Penalización Anual por Fallas

B. SIMBOLOGÍA

l/min	: Litros en minutos
°C	: Grados Celsius
Bar	: Unidad de presión
CLP	: Peso Chileno
USD	: Dólar estadounidense

INTRODUCCIÓN

La gestión del mantenimiento y sus activos es una parte crucial en cualquier empresa para garantizar la continuidad operativa de sus actividades y procesos, evitando atrasos por averías en los equipos, optimizando proceso, reduciendo costos que tengan relación con insumos y recursos humanos.

La importancia de mantener estándares altos de desempeño y calidad en el área de procesamiento del agar-agar, un espesante y gelificante marino extraído del alga *Gracilaria* (pelillo), es debido a su variedad de usos en diversos ámbitos de la industria, tales como: la microbiología como un medio de cultivo para el crecimiento de microorganismos, como bacterias, hongos y microalgas; industria alimenticia, utilizado como agente gelificante en la fabricación de productos como gelatinas, postres, caramelos, dulces y alimentos en conserva, industria cosmética, utilizado en la fabricación de productos cosméticos, como cremas, lociones y geles, para proporcionar consistencia y estabilidad, industria farmacéutica, utilizado como agente espesante y gelificante en la producción de cápsulas y tabletas, entre otras aplicaciones que no se limitan a estas áreas.

El presente trabajo de título se origina a partir de las problemáticas y la gran cantidad de fallas detectadas en el proceso de prensado de una planta procesadora de algas (alrededor de 12 a 37 fallas anuales respecto a otras zonas que se sitúan en el rango de 3 a 6 fallas/año), situada en La Calera, la cual se especializa en la producción de agar. Esta planta cuenta con aproximadamente 255 trabajadores y está organizada en dos sectores principales: el Sector Húmedo, donde se llevan a cabo los procesos fundamentales de elaboración, que incluyen la recepción, tratamiento y procesamiento del alga para convertirla en agar; y el Sector de Molienda, encargado de ajustar la granulometría del producto, clasificarlo según su calidad y, finalmente, envasarlo para su exportación y venta.

Entre las dificultades identificadas en el proceso de prensado se destacan la pérdida de producto en las prensas, que oscila entre el 20% y el 30%, Además, se han observado fugas y deterioro prematuro del aceite de las prensas debido a altas temperaturas y partículas contaminantes externas, así como la presencia de corrosión en la estructura de estas, lo que compromete su integridad. También se han detectado problemas que representan riesgos para la seguridad de los trabajadores, tales como el estado deteriorado y corroído del piso, que aumenta el riesgo de caídas o accidentes, y la ausencia de líneas de vida para garantizar una protección adecuada en trabajos en altura. La solución a las problemáticas se llevará a cabo mediante la metodología de análisis causa raíz, utilizando herramientas como el diagrama de Ishikawa o espina de pescado, lo que permitirá identificar las causas de las fallas. A partir de este análisis, se priorizarán dos problemáticas clave, seleccionadas con base en su impacto económico y en la seguridad laboral.

OBJETIVO GENERAL

Proponer un plan de mejora en la gestión del mantenimiento en el área de prensado en una planta procesadora de algas, aplicando la metodología de análisis causa-raíz determinando las causas que originan las falencias y elaborando propuestas de oportunidades de mejoras, validándolas técnica y económicamente.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Diagnosticar el estado de las áreas críticas de la empresa, mediante visitas a terreno y recopilación de información, determinando las problemáticas presentes en la gestión de mantenimiento.
- Desarrollar una metodología de análisis causa raíz a las problemáticas más críticas determinadas en el diagnostico, describiendo las causas que originan estos defectos y proponiendo planes de mejora.
- Evaluar técnica y económicamente el plan de mejora, mediante indicadores acordes que determinen la viabilidad del proyecto.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1 CONTEXTO OPERACIONAL

La planta procesadora de algas ubicada en la región de Valparaíso, Calera, se especializa en la producción de agar, un producto versátil y altamente demandado en diversas industrias, El agar se extrae de ciertas especies de algas rojas, las cuales son recolectadas principalmente en las costas de Chile.

Según el INE, Chile produce más de 5000 toneladas de agar-agar al año, siendo Asia el principal destino de exportación, El Procesamiento exige cumplimientos con normativas sanitarias como la NCh1258 Higiene de procesos y de seguridad como el D.S 594 Condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo

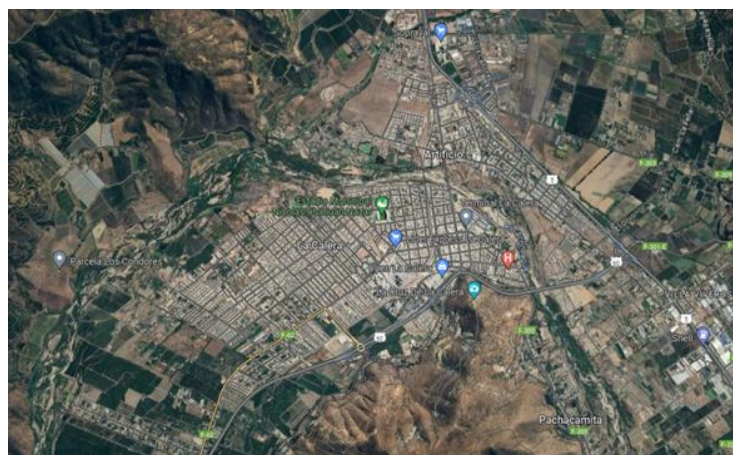


Figura 1-1 Ubicación de la planta; La Calera, Artificio Fuente: Google Maps

¿Qué es el agar?

El agar-agar es un polisacárido con propiedades gelificantes y la capacidad de espesar, sin variar el color, olor y sabor de los productos en los que se usa. Se clasifica como un aditivo espesante bajo la nomenclatura E-406. Este producto es de origen marino y se extrae del alga Gracilaria, comúnmente conocida como pelillo, que se encuentra en toda la costa chilena. La calidad del agar varía en diferentes grados de pureza, lo que determina su valor comercial y su clientela en el mercado. Gran parte de la producción se destina a la exportación, principalmente hacia Asia y Europa, donde existe una demanda significativa por agar de alta calidad.

Principales usos del agar:

- **Industria alimenticia:** Fabricación de gelatinas, espesante en helados, yogur, sopas, mermeladas y varios tipos de postres.
- **Industria microbiológica:** Placas de agar para cultivar microorganismos.

- **Industria farmacéutica:** Uso como laxante debido a su alto contenido en fibra, y por su bajo aporte de calorías, grasas y azúcar.
- **Industria cosmética:** Elaboración de cremas faciales y corporales, desmaquillantes en crema, entre otros productos.

1.1.1. Clientes

La mayoría de las ventas se realizan mediante exportaciones a Asia y algunas partes de Europa. Estos clientes adquieren el agar y lo utilizan según sus necesidades, ya sea en la fabricación de productos o para su distribución directa al consumidor final.

1.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE PRODUCCION DE AGAR

Recolección:

El primer paso en la producción de agar es la recolección de algas rojas, principalmente de *Gracilaria*, más conocidas como “pelillo” Estas algas se recogen manualmente o utilizando herramientas.

Lavado de Algas:

Las algas recolectadas se someten a un riguroso proceso de lavado para eliminar impurezas como arena, sal, conchas y otros materiales no deseados. Este lavado se realiza varias veces para asegurar la limpieza completa de las algas. Este paso es esencial para prevenir la contaminación del agar durante el proceso de extracción.

Extracción:

Las algas limpias se hidratan durante para reconstituirlas y facilitar la extracción del agar. Luego, las algas hidratadas se transfieren a grandes calderas donde se hierven en agua. La cocción dura varias horas, durante las cuales el agar se disuelve en el agua, formando una solución viscosa.

Filtrado del Extracto:

La solución caliente que contiene el agar disuelto se filtra para eliminar los restos sólidos de las algas. Este filtrado se realiza a través de tamices finos o filtros de presión para asegurar que la solución de agar quede libre de impurezas. El resultado es una solución clara y purificada de agar.

Gelificación:

La solución filtrada se deja enfriar gradualmente. Al bajar la temperatura, el agar se solidifica, formando un gel firme. Este proceso de gelificación convierte la solución líquida en una masa sólida que se puede manipular más fácilmente en las etapas posteriores.

Prensado:

El gel de agar se somete a un prensado para eliminar el exceso de agua. Este prensado se realiza utilizando prensas hidráulicas, que comprimen el gel y extraen la mayor cantidad posible de agua. El prensado resulta en láminas de agar más densos y compactos.

Secado:

Las láminas de agar se disponen en bandejas y se secan en secadores mecánicos. El secado puede durar varias horas. Durante este proceso, el contenido de humedad del agar se reduce significativamente, lo que facilita su conservación y almacenamiento.

Molienda y Envasado:

El agar seco se tritura en pequeños fragmentos y luego se muele hasta obtener un polvo fino. Este polvo se tamiza para asegurar una distribución uniforme del tamaño de las partículas, lo que es importante para su uso en aplicaciones donde la consistencia es crítica. El agar en polvo se envasa en bolsas, que lo protegen de la humedad y otras contaminaciones.

Durante todo el proceso de producción se realizan pruebas para asegurar la calidad, como mediciones de pH, índices de contaminación/pureza.

1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

La estructura organizacional de la planta es de tipo centralizado, con una jerarquía encabezada por el director general de la empresa, seguido por el gerente de planta, el departamento de recursos humanos, el jefe de producción, el área de mantenimiento, los supervisores de turno y, finalmente, los operadores de planta. En total, la planta cuenta con aproximadamente 255 trabajadores, distribuidos en las distintas áreas.

El Gerente de Planta es responsable de definir los criterios operativos de la instalación, mientras que el área de mantenimiento se encarga de la gestión de los activos y de implementar sistemas de control para su adecuado funcionamiento.

El área de mantenimiento está compuesta por un equipo de 9 mecánicos y 6 electricistas, quienes reportan directamente a sus respectivos supervisores. Estos supervisores, a su vez, dependen del jefe de mantenimiento.

1.4 LAYOUT PRENSA

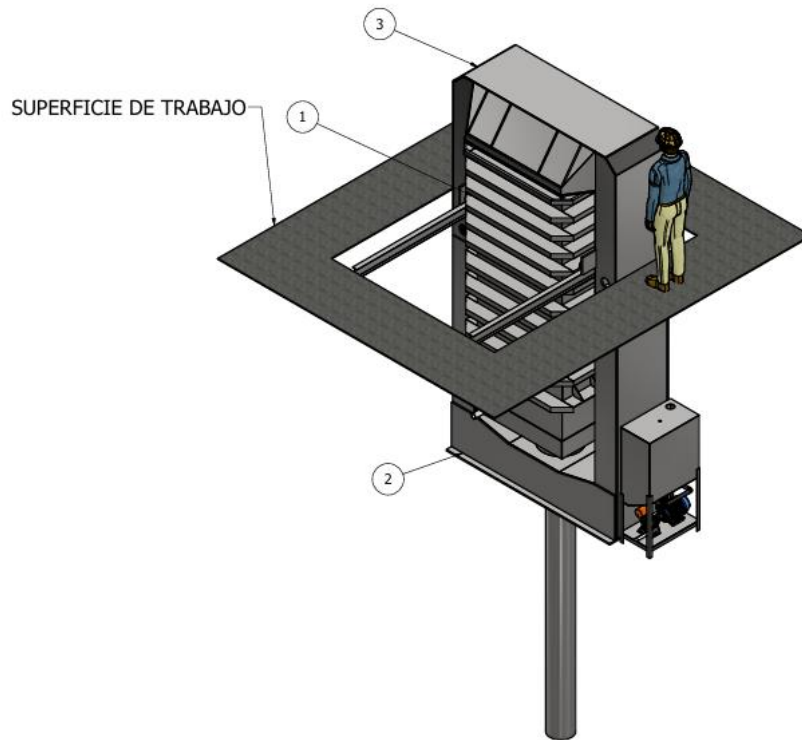


Figura 1-2. Modelo de Prensa, Fuente: Rolando Cavieres

1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El área de prensado se ha identificado como crítica por que presenta una tasa de fallas anuales significativamente alta, entre 12 y 37, en comparación con otras áreas como molienda o gelificación, donde el promedio anual de fallas es considerablemente menor, entre 3 y 6. La exposición continua de los equipos y estructuras a materiales corrosivos utilizados en el proceso de agar ha deteriorado gravemente los rieles de seguridad, los soportes estructurales y la estructura de las prensas, estos daños comprometen la seguridad de los trabajadores, exponiéndolos a riesgos graves que pueden afectar su bienestar y, en casos extremos, poner en peligro sus vidas debido a la posibilidad de accidentes laborales fatales. Las fallas frecuentes afectan la capacidad de producción, provocando interrupciones constantes y dificultan el cumplimiento de la demanda de producción.

Estas deficiencias generan un aumento significativo en los costos de mantenimiento, ya que las reparaciones y ajustes frecuentes para mantener el área operativa incrementan los gastos y reducen la rentabilidad global de la planta.

Dado el impacto de estos problemas en la seguridad, la eficiencia y los costos de mantenimiento, se requieren acciones correctivas en el área de prensado para garantizar un

entorno de trabajo seguro, optimizar la producción y reducir los costos de mantenimiento, asegurando así la sostenibilidad de la planta.

A continuación, se describen las principales problemáticas identificadas en el área de prensado:

1.5.1 Corrosión en las estructuras y equipamiento

El trabajo con químicos corrosivos en un ambiente extremadamente húmedo tiene un impacto significativo en la integridad de los materiales estructurales, especialmente en el metal que no ha sido tratado adecuadamente para prevenir la corrosión. Esta situación ha llevado a un nivel avanzado de deterioro en las estructuras de las prensas, encontrándose algunas incluso en estado de desuso. Adicionalmente, los soportes de la estructura general del galpón, donde operan los trabajadores y la maquinaria, también están severamente afectados. Cabe destacar que los rieles de seguridad, diseñados para prevenir caídas, están completamente corroídos y debilitados, representando un riesgo inminente de accidentes graves.

Asimismo, los soportes del segundo piso presentan corrosión, pero esto no es visible desde la perspectiva del empleado, lo que puede llevar a que pisen en una zona completamente deteriorada y sufran un accidente



Figura 1-3. Estructura de Prensa Corroída, Fuente: Elaboración Propia, Visitas a terreno

1.5.2 Ausencia de líneas de vida

Realizar el mantenimiento en el área de prensado requiere una considerable cantidad de trabajo en altura, aproximadamente a 5 metros desde la base de la prensa hasta el piso superior. Esta área carece de protecciones adecuadas para evitar caídas, como una línea de vida que el equipo de mantenimiento pueda utilizar. Además, el área no está optimizada para ciertos trabajos, lo que obliga al uso de técnicas no convencionales.



Figura 1-4. Tapa de Prensa, Fuente: Elaboración Propia, Visita a terreno

1.5.3 Deterioro prematuro de componentes y aceite hidráulico

El ciclo de trabajo de las prensas tiene una duración aproximada de cuatro horas. Durante este periodo, las prensas alcanzan presiones sostenidas de hasta 250 bar, lo que genera una gran cantidad de calor en el aceite hidráulico, elevando su temperatura a entre 95°C y 100°C. Sin embargo, estas prensas no están equipadas con un intercambiador de calor, por lo que no pueden reducir la temperatura del aceite a los niveles operativos recomendados (50°C a 80°C como máximo). Como resultado, el aceite pierde sus propiedades fundamentales, afectando negativamente a las mangueras hidráulicas, que se cristalizan y comienzan a "sudar". Este fenómeno es observable cuando una manguera parece estar mojada sin tener una fuga visible.

De manera similar, los sellos de los cilindros se queman debido a las altas temperaturas, provocando fugas. El reemplazo de estos sellos añade aún más costos al mantenimiento. Además, el manejo del aceite hidráulico no es el adecuado, ya que algunos tanques de almacenamiento de aceite de las prensas se encuentran sin tapas, permitiendo la entrada de partículas contaminantes que dañan los elementos internamente, como la bomba y el cilindro.

Esta situación genera costos significativos, ya que es necesario rellenar el tanque de aceite (Estanque de 200 L), reemplazar las mangueras hidráulicas cuyo costo comercial ronda el millón de pesos chilenos, y adquirir un bin adicional de aceite de grado alimenticio (1000 litros). En condiciones normales, un bin de 1000 litros de aceite debería durar un mes, pero debido a las fugas, se requieren dos bin al mes, incrementando considerablemente los costos operativos.

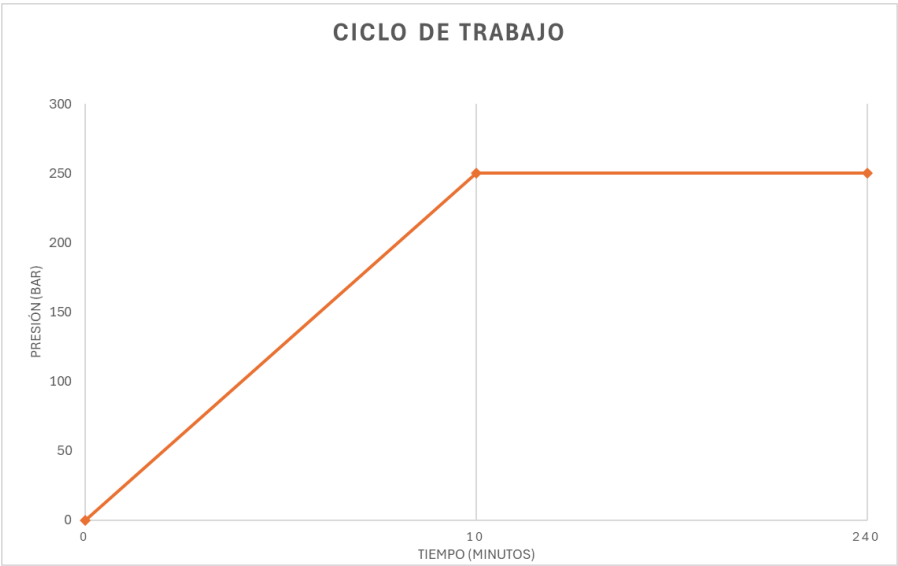


Gráfico 1-1. Ciclo de trabajo de una Prensa, Fuente: Elaboración Propia

1.5.4 Pérdida de producto

Una de las problemáticas que afectan a las prensas es la pérdida significativa de producto durante el proceso de extracción de humedad. Al momento de prensar y extraer el líquido, una parte considerable del producto se va con el agua, resultando en una pérdida del 20% al 30% del material original. Este cálculo se realiza midiendo la cantidad de litros de gel que entra a la prensa (3000 L), y comparándolo con lo que sale de esta (150 KG).



Figura 1-5. Pérdida de producto en Prensado, Fuente: Elaboración propia, Visita a terreno

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍAS

2 METODOLOGIAS

En este capítulo, se desarrollará el marco teórico que sustentará la propuesta de mejora en la gestión de mantenimiento de la planta procesadora de algas. Se revisarán las teorías y conceptos clave relacionados con la metodología de análisis causa-raíz y las estrategias de mantenimiento aplicadas en la industria.

2.1 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

La gestión de mantenimiento es una disciplina esencial en la industria, encargada de asegurar el funcionamiento eficiente y continuo de los equipos y maquinarias. Su objetivo principal es minimizar el tiempo de inactividad y los costos de reparación mediante el mantenimiento preventivo y correctivo. Entre las estrategias más comunes se encuentran:

Mantenimiento Preventivo: Consiste en la realización de tareas de mantenimiento planificadas y periódicas con el fin de prevenir fallos en los equipos. Este tipo de mantenimiento ayuda a prolongar la vida útil de los activos y reducir el riesgo de fallas imprevistas.

Mantenimiento Predictivo: Utiliza técnicas de monitoreo y diagnóstico para predecir fallos antes de que ocurran. Esto permite programar las intervenciones de mantenimiento en el momento más adecuado, evitando interrupciones en la producción.

Mantenimiento Correctivo: Se lleva a cabo después de que se ha producido una falla. Aunque es el tipo de mantenimiento más reactivo y costoso, es necesario para restablecer el funcionamiento de los equipos.

2.2 METODOLOGIA DE ANALISIS CAUSA RAIZ

El Análisis Causa-Raíz (ACR) es una metodología sistemática utilizada para identificar las causas subyacentes de los problemas y fallos en los sistemas. Esta metodología no solo aborda los síntomas del problema, sino que busca entender las causas fundamentales para evitar recurrencias. El proceso de ACR generalmente incluye los siguientes pasos:

Identificación del Problema: Definir claramente el problema o fallo que se está investigando.

Recolección de Datos: Recopilar información relevante sobre el problema, incluyendo datos históricos, observaciones y testimonios de los involucrados.

Análisis de Causas: Utilizar herramientas como el diagrama de Ishikawa (diagrama de espina de pescado) o los 5 porqués para identificar las posibles causas del problema.

Determinación de la Causa Raíz: Evaluar las causas identificadas para determinar cuál es la raíz del problema.

Desarrollo de Soluciones: Proponer acciones correctivas y preventivas para eliminar la causa raíz y evitar la recurrencia del problema.

2.2.1 Definición y jerarquización de problemas

Para la selección y priorización de problemas, se utiliza un enfoque basado en el análisis de criticidad y el cálculo del riesgo total anualizado, permitiendo identificar y jerarquizar las problemáticas en función de su impacto en la operación, la seguridad y los costos asociados.

“Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos). En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan”. (Lozano Fernández, 2019)

El análisis de criticidad es un proceso que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos con base en su impacto global en las operaciones. Para llevar a cabo este análisis, se consideran los siguientes criterios:

- Seguridad
- Ambiente
- Producción
- Costes (Operaciones y Mantenimiento) o Frecuencia de fallos.
- Tiempo promedio para reparar

Donde:

$Riesgo = Frecuencia * Consecuencia$

$Frecuencia = \# \text{ de fallos en un tiempo determinado (problemas)}$

$Consecuencia = ((Impacto operacional * Flexibilidad) + \text{costes Mtto} + \text{Impacto SHA})$

El Riesgo Total Anualizado “Es un modelo cuantitativo que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función del riesgo asociado con la probabilidad de ocurrencia de un evento o falla y la consecuencia que este ocasiona, con el fin de optimizar luego la asignación de recursos económicos, humanos y técnicos” (Berroteran et al., s. f.).

Se le asocian las siguientes ecuaciones:

- $CAR = FF \times (CMO + CM)$
- $PAF = FF \times PE, PE = TR \times IP$

- $RTA = CAR + PAF$

Donde:

- FF: frecuencia de fallos (fallos/año)
- CMO: Costes mano obra (M\$)
- CM: Costes materiales (M\$)
- CAR: Costes anuales de reparación (M\$/año)
- TR: tiempo de reparación (horas)
- IP: impacto producción (M\$/hora)
- PE: penalización x evento fallo (M\$/fallo)
- PAF: penalización anual por evento de fallos (M\$/año).
- RTA: riesgo total anualizado (M\$/año)

2.2.2 Definición y priorización de los modos de falla

Son los eventos físicos encontrados una vez que ocurre un incidente de paro imprevisto, se utilizará el Análisis del modo y Efecto de la Falla (AMEF), para identificar sistemáticamente: La función del activo y del componente que falla, las fallas asociadas, el impacto del desempeño global y la causa de la falla.

2.2.3 Definición y validación de hipótesis

Lista de posibles mecanismos que provocan los eventos de fallo. Al ser verificada una hipótesis, esta se convierte normalmente en una causa raíz física.

2.2.4 Definición de causas raíz físicas, humanas y latentes

Las posibles causas raíz para cada hipótesis validada pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Causa Raíz Física: Aquellas que envuelven materiales o cosas tangibles.
- Causas Raíz Humana: Aquellas que generan fallas debido a una intervención inapropiada de un ser humano.
- Causas Raíz Latente: Falta o deficiencia en los sistemas gerenciales y administrativos (reglas, procedimientos, guías, etc.) o “normas culturales” que permiten que una falla ocurra.

2.2.5 Identificación e implementación de las soluciones

Las soluciones deben de estar acompañadas por un análisis Costo, Riesgo, Beneficio; estas deben seleccionarse si evitan o al menos reducen el problema o la recurrencia de fallo.

2.2.6 Evaluación de la efectividad de las soluciones

Debido a que esta es una propuesta de mejora, no se evaluarán resultados concretos, ya que no contempla la implementación de las soluciones planteadas. Sin embargo, se definirán indicadores clave de desempeño (KPI) que permitirán estimar los beneficios esperados de las propuestas.

- Disponibilidad(A)
Representa el porcentaje del tiempo disponible (de uso) del activo en un periodo determinado. $A = (TPO / (TPO + TPFS)) \times 100\%$
- Confiabilidad (TPO)
Representa en el tiempo promedio hasta una falla $TPO = \text{Sum TO} / \# \text{ fallas}$
- Mantenibilidad (TPFS)
Representa el tiempo promedio fuera de servicio $TPFS = \text{Sum TFS} / \# \text{ fallas}$
- Cumplimiento de inspecciones de seguridad
Porcentaje de inspecciones de seguridad completadas según el cronograma establecido

Si bien la metodología de Análisis Causa-Raíz (ACR) constituye el eje principal del presente trabajo, su efectividad puede potenciarse significativamente al complementarse con enfoques reconocidos de mantenimiento industrial como RCM (Reliability-Centered Maintenance), TPM (Total Productive Maintenance) y Lean Maintenance.

El RCM, centrado en la confiabilidad, permite priorizar intervenciones en activos críticos como las prensas hidráulicas, en función del impacto de sus fallas en la seguridad, producción y costos. Esto asegura que el análisis de causas raíz se aplique donde realmente se justifica su profundidad y esfuerzo. Por otro lado, el enfoque TPM incorpora activamente a los operarios en el cuidado diario de los equipos, desarrollando una cultura preventiva y facilitando la detección temprana de condiciones anómalas como fugas de aceite o corrosión estructural. Finalmente, Lean Maintenance aporta una visión de eficiencia operacional, buscando eliminar

tiempos muertos, sobreprocesos o recursos innecesarios durante las actividades de mantenimiento, haciendo más ágil y rentable la aplicación de mejoras. La integración de estas metodologías refuerza el enfoque sistemático del ACR, permitiendo establecer un plan de mantenimiento más robusto, participativo y alineado con la realidad operativa de la planta.

2.3 APLICACIÓN DE METODOLOGIA ANALISIS CAUSA RAIZ

2.3.1 Diagrama de Ishikawa

A continuación, se construye un diagrama de Ishikawa considerando la metodología de las 6M (Método, Mano de obra, Máquina, Materiales, Medioambiente y Medición), para representar gráficamente las posibles causas que contribuyen al deterioro estructural por corrosión y al mal funcionamiento del sistema hidráulico en el área de prensado. Este análisis permite identificar causas raíz tanto físicas como latentes, y orientar la toma de decisiones para la implementación de medidas correctivas y preventivas.

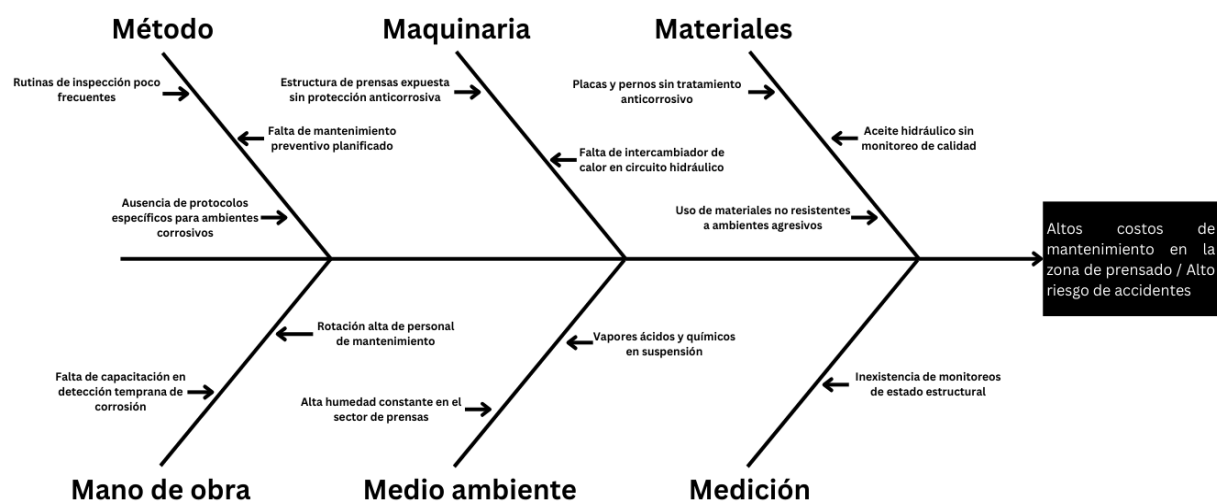


Figura 2-1. Diagrama de Ishikawa

2.3.2 Definición y jerarquización de problemas

Durante el año evaluado, se detectaron múltiples problemas recurrentes en el área de prensado, particularmente asociados al deterioro prematuro del aceite hidráulico, fugas continuas en los sistemas hidráulicos, y corrosión acelerada en la estructura metálica del área. Estos problemas ocasionan frecuentes detenciones no programadas, afectando gravemente la continuidad del proceso productivo y aumentando los costos operacionales.

Específicamente, se observó un deterioro acelerado del aceite hidráulico debido a las altas temperaturas alcanzadas por el sistema durante los ciclos de prensado, llegando regularmente entre 95°C y 100°C, muy por encima del rango óptimo recomendado (50°C a

80°C). Este calentamiento excesivo provoca que las mangueras hidráulicas pierdan flexibilidad, cristalizándose y generando fugas continuas. Adicionalmente, la falta de protección en los estanques de almacenamiento del aceite permite la entrada de contaminantes sólidos externos, lo que acelera el desgaste de sellos y bombas hidráulicas, aumentando así la frecuencia de fallas y reemplazos de componentes.

A su vez, el ambiente altamente húmedo y el contacto permanente con productos químicos corrosivos del proceso productivo aceleran el deterioro estructural de prensas, barandas y soportes metálicos. Esta corrosión severa representa un riesgo significativo para la seguridad del personal operativo y de mantenimiento, incrementando la probabilidad de accidentes laborales y generando constantes gastos en reparaciones estructurales.

Se identifican los principales problemas:

- Deterioro prematuro y fugas en sistemas hidráulicos
- Corrosión estructural acelerada
- Ausencia de líneas de vida para trabajos en altura
- Pérdidas significativas de producto durante el prensado

Con base en estas observaciones preliminares, se procede a desarrollar una matriz de criticidad, priorizando aquellas problemáticas cuya frecuencia de ocurrencia y consecuencias operativas, económicas y de seguridad presentan mayor relevancia (Puntaje)

Modelo de criticidad

Para definir la matriz de criticidad, se utilizarán las frecuencias de falla, Impacto en la seguridad e impacto en la producción con los costos de mantenimiento asociados a las perdidas productivas y reparaciones

Escala de evaluación para Frecuencia de Fallas

Frecuencia Anual	Puntaje
Alta (>12 Eventos / Año)	3
Media (Entre 6 y 12 Eventos / Año)	2
Baja (≤ 5 Eventos / Año)	1

Tabla 2-1. Evaluación de Frecuencia de Fallos

Escala de evaluación para Impacto en la Seguridad y Producción

Impacto	Seguridad	Producción y Costos	Puntaje
Alto (Critico)	Accidentes graves o fatales	Alta perdida productiva / económica	3
Medio	Accidentes moderados	Moderada pérdida económica	2
Bajo	Accidentes menores	Baja afectación económica	1

Tabla 2-2. Escala de Evaluación para Impacto, Seguridad y Producción

Matriz de criticidad

Problemática	Frecuencia	Seguridad	Producción y Costos	Criticidad Total
Corrosión en estructuras	3	3	3	18
Deterioro de aceite	3	2	3	15
Ausencia de líneas de vida	1	3	3	6
Perdida de producto	3	1	2	9

Tabla 2-3. Matriz de criticidad

Formula de Criticidad Total = Frecuencia x (Impacto Seguridad + Impacto Producción).

Tras realizar la matriz de criticidad, se determinó que los problemas con mayor puntaje son la Corrosión en estructuras (18 puntos) y el Deterioro prematuro del aceite hidráulico (15 puntos). Por esta razón, ambos problemas serán priorizados en el desarrollo del Análisis Causa Raíz (ACR), considerando que generan el mayor impacto económico, operativo y de seguridad dentro de la planta.

2.3.3 Definición del 1er problema a abordar

Corrosión en las estructuras y equipamiento

- ¿Qué Ocurrió?

Las estructuras de las prensas junto con los soportes y piso del segundo nivel se encuentran fuertemente corroídos y debilitados.

- ¿Cuándo Ocurrió?

Turno de la mañana del 8 de febrero del 2024 09:00 hrs

- ¿Dónde Ocurrió?

Quinta Región de Valparaíso, Planta de Agar ubicada en Artificio, Calera, En el área de Prensado.

- Perdidas

Hubo perdidas operacionales; Se detuvieron 3 prensas para poder reparar los soportes del piso que se encontraban corroídos.

Aumento el riesgo al trabajador; Gran aumento en el riesgo de caída o sufrir un accidente grave.

Aumento el costo de mantenimiento por reparación correctiva y se perdió mantenibilidad.

En la Siguiete tabla se especifica los costos asociados y las intervenciones realizadas

Componente Afectado	Fallas Anuales	Daño Estructural	MTTR (hrs)	Costos Anuales (CLP)
Rieles de seguridad	8	10	11	\$ 237,730,000
Soportes estructurales (columna)	-	5	-	-
Plataformas superiores	4	5	10	\$ 108,230,000
Estructuras de prensas	4	5	40	\$ 428,600,000

Tabla 2-4. Costos asociados e Intervención en estructuras del área de prensado

Los costos de producción del proceso son de \$2.625.000 [CLP/Hr]

Daño Estructural: Esta casilla ha sido incorporada para evaluar el nivel de corrosión y deterioro en las estructuras afectadas. Aunque algunas de ellas no han presentado fallas totales, muestran un grado significativo de corrosión que compromete su integridad.

La escala utilizada es la siguiente:

- Puntaje 0: No presenta signos de oxidación o corrosión.
- Puntaje 5: Presenta signos de oxidación visible y corrosión moderada con un nivel de afectación intermedio.
- Puntaje 8: Presenta oxidación visible y corrosión severa con un nivel de afectación severo. con indicios de daño estructural
- Puntaje 10: Estructura completamente corroída y oxidada, en estado crítico de daño.

Aunque los soportes estructurales principales de la zona de prensado no han presentado fallas directas a la fecha, durante las inspecciones visuales se identificaron signos avanzados de corrosión y oxidación, especialmente en las columnas que sustentan el segundo nivel. Este deterioro progresivo compromete la integridad estructural del sistema, representando un riesgo potencial de colapso local o debilitamiento ante vibraciones o cargas operativas.

Se considerará dentro de la propuesta para evaluar mediante ensayos no destructivos (END), tales como ultrasonido o medición de espesores, para determinar la severidad de la corrosión. Dependiendo de los resultados, se podría requerir la restauración parcial mediante refuerzos estructurales o, en casos más críticos, la sustitución total de los elementos comprometidos.

Definición y priorización de los modos de falla

Componente	Modos de fallas	Frecuencia de eventos por año fallas/año (promedio)	TPPR horas (promedio)	Imp. Prod. \$/hora (promedio)	Costos directos por falla \$/falla (promedio)	Riesgo \$/año (promedio)
Riel de Seguridad	Perdida de integridad estructural debido a corrosión	8	11	\$ 2,625,000	\$ 841,250	\$ 237,730,000
Plataformas superiores	Perdida de capacidad portante por soportes corroídos	4	10	\$ 2,625,000	\$ 807,500	\$ 108,230,000
Estructuras de Prensas	Deformación o fallo estructural en soportes y estructura por debilitamiento por corrosión	4	40	\$ 2,625,000	\$ 2,150,000	\$ 428,600,000

Figura 2-2. Matriz Cuantitativa de Riesgo, Estructuras y equipamiento

Sumatoria total de RTA = \$ 774,560,000 CLP



Figura 2-3. Modos de falla para la realización de ACR, Estructuras y Equipamiento

Definición y validación de hipótesis

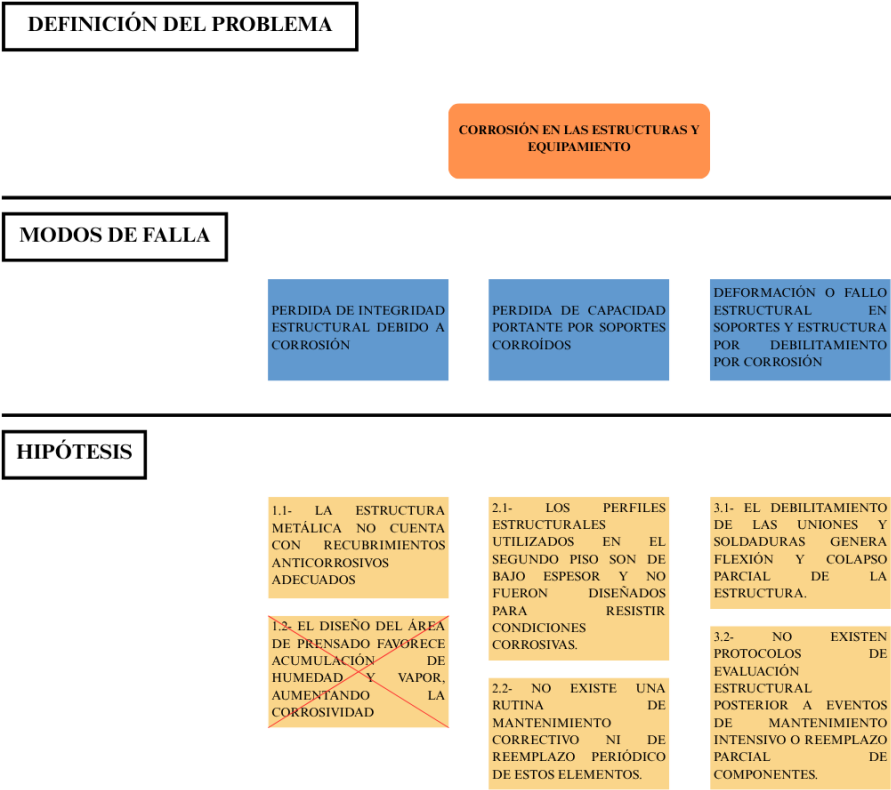


Figura 2-4. Árbol de fallas e hipótesis, Estructuras y Equipamiento

Con el fin de identificar las causas raíz de las fallas observadas, se desarrolló un árbol de fallas que organiza los distintos modos de falla junto a sus respectivas hipótesis técnicas. Las hipótesis están referenciadas numéricamente de acuerdo con su posición en el gráfico y serán analizadas para confirmar o descartar su relación directa con las fallas críticas del sistema.

1.- Pérdida de integridad estructural debido a corrosión

1.1- La estructura metálica no cuenta con recubrimientos anticorrosivos adecuados: ¿Por qué?, Con base en la inspección realizada por el equipo de mantenimiento, se determinó que las superficies metálicas (rieles de seguridad), presentaban recubrimientos de pintura, pero no del tipo epóxico ni con propiedades anticorrosivas adecuadas. Esta deficiencia ha permitido una rápida acción del ambiente sobre los metales, favoreciendo su corrosión. Asimismo, se constató que los materiales utilizados no son aptos para operar en zonas con altos niveles de humedad y agentes corrosivos, lo que ha acelerado su deterioro estructural.

Hipótesis: Validada

1.2- El diseño del área de prensado favorece acumulación de humedad y vapor, aumentando la corrosividad: ¿Por qué?, Durante el análisis en terreno, se evaluó la distribución y configuración del área de prensado, no encontrándose evidencias que indicaran una acumulación excesiva de humedad o vapor como resultado del diseño constructivo. La zona cuenta con ventilación adecuada y no presenta sectores cerrados o confinados que favorezcan la retención de humedad. Por lo tanto, se concluye que el diseño del área no influye de manera significativa en el proceso de corrosión, descartándose esta hipótesis como causa raíz.

Hipótesis: Descartada

2.- Pérdida de capacidad portante por soportes corroídos

2.1- Los perfiles estructurales utilizados en el segundo piso son de bajo espesor y no fueron diseñados para resistir condiciones corrosivas: ¿Por qué?, A partir de la revisión visual y el análisis de documentación técnica disponible, se constató que los perfiles estructurales instalados en el segundo piso presentan un espesor reducido y no corresponden a secciones reforzadas ni galvanizadas. Además, no se evidenció el uso de materiales con propiedades anticorrosivas ni protección adicional para ambientes agresivos. Estas condiciones estructurales no son compatibles con zonas expuestas a alta humedad y agentes corrosivos

Hipótesis: Validada

2.2- No existe una rutina de mantenimiento correctivo ni de reemplazo periódico de estos elementos: ¿Por qué?, La revisión de los registros de mantenimiento evidenció que no se realiza un seguimiento ni una planificación preventiva orientada a los soportes estructurales del segundo piso. Las intervenciones detectadas son esporádicas y reactivas, ejecutadas solo ante fallas visibles o cuando el deterioro ya es evidente. **Hipótesis: Validada**

3.- Deformación o fallo estructural en soportes y estructura por debilitamiento por corrosión

3.1- El debilitamiento de las uniones y soldaduras genera flexión y colapso parcial de la estructura: ¿Por qué?, Se observó que la estructura de las prensas, sometida a esfuerzos considerables durante su operación, presenta puntos de soldadura visiblemente afectados por la corrosión. Esta condición ha generado una pérdida progresiva de resistencia en las uniones críticas, permitiendo que la estructura se deforme y pierda su alineación original. Como consecuencia, se han producido fisuras estructurales y, en algunos casos, fallas localizadas con desprendimiento parcial de componentes. **Hipótesis: Validada**

3.2- No existen protocolos de evaluación estructural posterior a eventos de mantenimiento intensivo o reemplazo parcial de componentes: ¿Por qué?, La revisión de los procedimientos internos reveló que no existen protocolos estandarizados para verificar la condición estructural tras mantenimientos mayores o modificaciones en componentes. Esta ausencia de controles posteriores impide detectar daños residuales o debilidades inducidas, permitiendo que las fallas estructurales evolucionen sin ser abordadas oportunamente. **Hipótesis: Validada**

Causas raíz físicas, humanas y latentes

Se detallan las causas raíz de acuerdo con la descripción, desarrollando el análisis correspondiente a las causas físicas, humanas y latentes

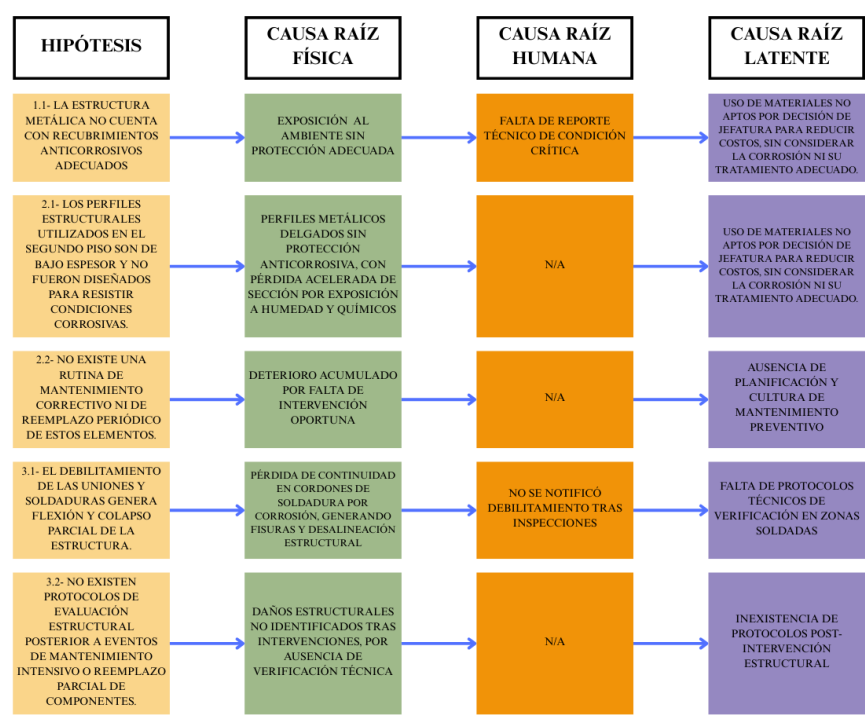


Figura 2-5. Tabla de Causas Raíz, Estructuras y Equipamiento

2.3.4 Definición del 2do problema a abordar

Deterioro prematuro de componentes y aceite hidráulico

- ¿Qué Ocurrió?

El aceite hidráulico utilizado en las prensas se ve contaminado y pierde sus propiedades prematuramente, se detectan fugas, mangueras hidráulicas cristalizadas y sellos quemados.

- ¿Cuándo Ocurrió?

Turno de la mañana del 10 de febrero del 2024 08:26 hrs

- ¿Dónde Ocurrió?

Quinta Región de Valparaíso, Planta de Agar ubicada en Artificio, Calera, En el área de Prensado.

- Perdidas

Hubo perdidas operacionales; Se detuvo 1 prensas para poder reparar las fugas y rellenar el aceite.

Aumento el costo de mantenimiento por reparación correctiva y se perdió mantenibilidad.

En la Siguiete tabla se especifica los costos asociados y las intervenciones realizadas

Componente Afectado	Fallas Anuales	MTTR (hrs)	Costos Anuales (CLP)
Sellos	6	8	\$ 130,116,000
Mangueras hidráulicas	5	5	\$ 76,968,750
Aceite hidráulico	6	1	\$ 17,248,500
Bomba hidráulica	2	8	\$ 45,940,000
Cilindro hidráulico	1	1	\$ 133,850,000

Tabla 2-5. Costos asociados e Intervenciones en el sistema hidráulico de las prensas

Los costos de producción del proceso son de \$2.625.000 [CLP/Hr]

Definición y priorización de los modos de falla

Componentes	Modos de fallas	Frecuencia de eventos por año fallas/año (promedio)	TPPR horas (promedio)	Imp. Prod. \$/hora (promedio)	Costos directos por falla \$/falla (promedio)	Riesgo \$/año (promedio)
Sellos	Fuga de sellos	6	8	\$ 2,625,000	\$ 686,000	\$ 130,116,000
Mangueras hidráulicas	Mangueras "sudadas"	5	5	\$ 2,625,000	\$ 2,268,750	\$ 76,968,750
Aceite hidráulico	Aceite sobrecalentado	6	1	\$ 2,625,000	\$ 249,750	\$ 17,248,500
Bomba hidráulica	Bomba con desgaste de componentes internos	2	8	\$ 2,625,000	\$ 1,970,000	\$ 45,940,000
Cilindro hidráulico	Vastago de prensa desgastado	1	50	\$ 2,625,000	\$ 2,600,000	\$ 133,850,000

Figura 2-6. Matriz Cuantitativa de Riesgo, Sistema hidráulico

Sumatoria total de RTA = \$ 404.123.250 CLP

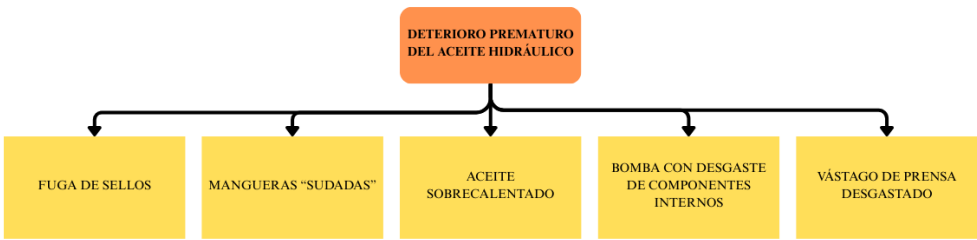


Figura 2-7. Modos de falla para la realización de ACR, Sistema hidráulico

Definición y validación de hipótesis

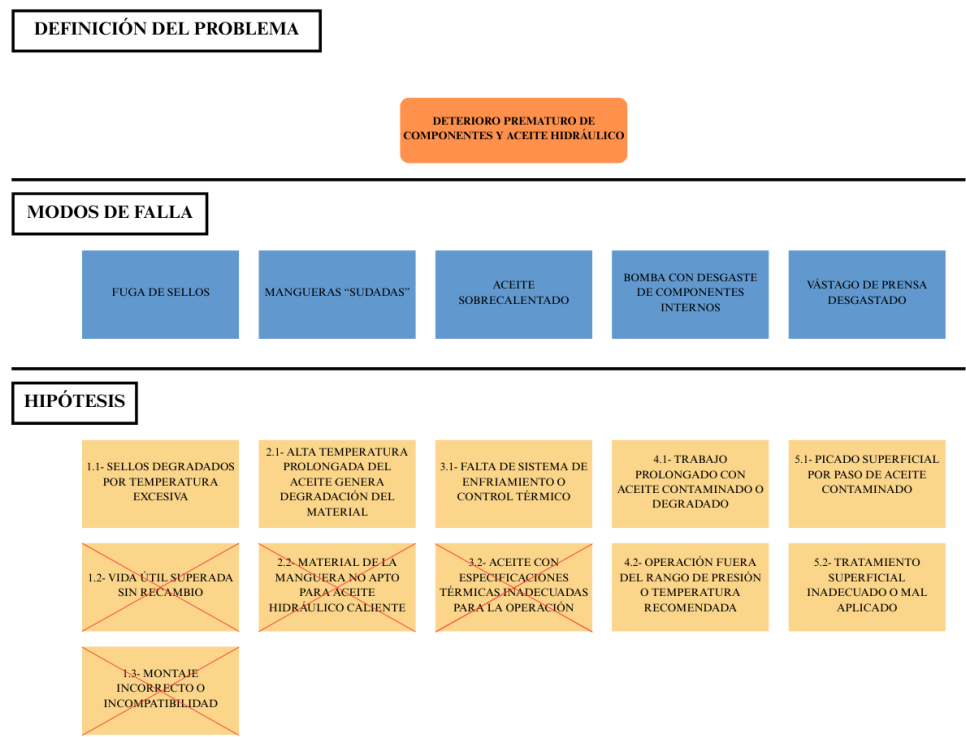


Figura 2-8. Árbol de fallas e hipótesis, Sistema hidráulico

Con el fin de identificar las causas raíz de las fallas observadas, se desarrolló un árbol de fallas que organiza los distintos modos de falla junto a sus respectivas hipótesis técnicas. Las hipótesis están referenciadas numéricamente de acuerdo con su posición en el gráfico y serán analizadas para confirmar o descartar su relación directa con las fallas críticas del sistema.

1.- Fuga de sellos

1.1- Sellos degradados por temperatura excesiva: ¿Por qué?, Durante la revisión de sellos retirados se observaron signos de endurecimiento y quemado superficial. estos síntomas son típicos de exposición a altas temperaturas de forma continua. **Hipótesis: Validada**

1.2- Vida útil superada sin recambio: ¿Por qué?, Según el historial de mantenimiento, no existe una frecuencia establecida para el reemplazo de sellos y no se realizan recambios preventivos. Sin embargo, se determinó que la mayor parte del daño observado está relacionado con temperatura altas, ya que las fallas ocurren mucho antes de que se alcance su vida útil estimada. **Hipótesis: Descartada**

1.3- Montaje incorrecto o incompatibilidad: ¿Por qué?, No se encontraron evidencias de errores de instalación ni uso de sellos incompatibles en los reportes técnicos ni durante la inspección. Además, los daños observados en los sellos no son consistentes con una instalación deficiente, sino que presentan características típicas de degradación por exposición prolongada a altas temperaturas. **Hipótesis: Descartada**

2.- Mangueras “sudadas”

2.1- Alta temperatura prolongada del aceite genera degradación del material: ¿Por qué?, Las mangueras presentaban microfisuras y pérdida de elasticidad externa, compatibles con daño térmico. Se evidencia la ausencia de un sistema de enfriamiento, lo que mantiene el aceite constantemente sobre 90 °C. **Hipótesis: Validada**

2.2- Material de la manguera no apto para aceite hidráulico caliente: ¿Por qué?, Se verificó que las mangueras utilizadas corresponden a componentes adecuados para el funcionamiento hidráulico de las prensas, y no se encontraron indicios de incompatibilidad con el tipo de fluido. Sin embargo, al no contar con un sistema de enfriamiento, la temperatura del aceite se eleva por sobre los parámetros normales de operación. **Hipótesis: Validada**

3.- Aceite sobrecalentado

3.1- Falta de sistema de enfriamiento o control térmico: ¿Por qué?, Las prensas no cuenta con un intercambiador de calor ni sistema de regulación térmica del aceite. Solo se monitorea el nivel, pero no la temperatura del fluido. **Hipótesis: Validada**

3.2- Aceite con especificaciones térmicas inadecuadas para la operación: ¿Por qué?, El aceite utilizado en las prensas es de grado alimenticio, conforme a los requerimientos del proceso de producción de agar, y posee las propiedades adecuadas para operar en sistemas hidráulicos. Por lo tanto, el problema no radica en el tipo de aceite, sino en las elevadas temperaturas a las que es sometido durante la operación. **Hipótesis: Descartada**

4.- Bomba con desgaste de componentes internos

4.1- Trabajo prolongado con aceite contaminado o degradado: ¿Por qué?, Durante la inspección, se constató que varios estanques de aceite hidráulico operan sin sus tapas de cierre, lo que permite la entrada de partículas externas al fluido. Esta contaminación, sumada a las altas temperaturas registradas durante el funcionamiento, acelera significativamente el deterioro del aceite y, en consecuencia, el desgaste interno de la bomba hidráulica. **Hipótesis: Validada**

4.2- Operación fuera del rango de presión recomendado: ¿Por qué?, No se encontraron reportes ni indicios de que las prensas operen sobre la presión establecida. Además, las unidades cuentan con una válvula limitadora calibrada a la presión de trabajo recomendada, la cual solo puede ser ajustada por el equipo de mantenimiento. Por lo tanto, se confirma que la bomba opera dentro de sus parámetros establecidos. **Hipótesis: Descartada**

5.- Vástago de prensa desgastado

5.1- Picado superficial por paso de aceite contaminado: ¿Por qué?, Durante la inspección del vástago, se evidenciaron zonas con desgaste puntual y picado superficial. El equipo de mantenimiento indicó que la filtración de partículas sólidas en el aceite podría haber causado ese daño. **Hipótesis: Validada**

5.2- Tratamiento superficial inadecuado o mal aplicado: ¿Por qué?, Según lo reportado por el jefe de mantenimiento, el vástago fue recubierto con un tratamiento cerámico externo, el cual falló a corto plazo. El daño se mantuvo o reincidió tras la reparación, lo que indica que el tratamiento no fue el adecuado para la exigencia del equipo. **Hipótesis: Validada**

Causas raíz físicas, humanas y latentes

Se detallan las causas raíz de acuerdo con la descripción, desarrollando el análisis correspondiente a las causas físicas, humanas y latentes



Figura 2-9. Tabla de Causas Raíz, Sistema hidráulico

Como se observa en la figura anterior, las hipótesis validadas, describen una serie de causas, llegando a cada modo de falla e hipótesis a su causa latente. A continuación, se desarrollará para cada modo de falla e hipótesis validada, una solución recomendada, la cual también se evaluará económicamente entregando costos para el conjunto de recomendaciones.

2.4 PROPUESTAS DE SOLUCIONES

En función del análisis causa-raíz realizado para las dos problemáticas principales identificadas **corrosión estructural en las plataformas y estructuras del área de prensado, y deterioro prematuro del aceite hidráulico en el sistema de las prensas**, se han formulado una serie de soluciones técnicas y de gestión que buscan atacar directamente las causas físicas, humanas y latentes validadas.

Las propuestas que se presentan a continuación tienen por objetivo mitigar la recurrencia de las fallas observadas, aumentar la confiabilidad operativa de los equipos y disminuir los riesgos asociados a la seguridad del personal y la pérdida de disponibilidad de los activos. Estas soluciones consideran medidas de tipo correctivo, preventivo y organizacional, y han sido diseñadas en coherencia con los hallazgos de la metodología ACR aplicada.

2.4.1 Corrosión en las estructuras y equipamiento

Diseño e implementación de un plan de mantenimiento preventivo estructural

En la planta, debido a decisiones de jefatura orientadas a minimizar costos y una visión del mantenimiento centrada exclusivamente en la corrección de fallas, no se ha implementado una rutina de inspección ni de control del estado estructural. Ante esta situación, se propone el desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo de carácter trimestral, que contemple inspecciones visuales y monitoreo del espesor en las zonas más críticas, tales como los soportes de las plataformas superiores y los rieles de seguridad. Esta medida debe ir acompañada de un proceso de culturización organizacional que refuerce la importancia del mantenimiento como herramienta clave para la optimización de costos, la confiabilidad operativa y la prevención de riesgos en planta.

Reemplazo de perfiles estructurales

Se recomienda la sustitución total de los rieles de seguridad y de los soportes de las plataformas superiores del área de prensado, priorizando aquellos casos en que se haya verificado una pérdida significativa de espesor o daño estructural. El reemplazo debe realizarse utilizando perfiles metálicos de mayor espesor, fabricados en acero galvanizado o acero inoxidable, complementados con la aplicación de recubrimientos anticorrosivos en todos los componentes que se vean expuestos al ambiente. Esta medida no solo extenderá significativamente la vida útil de los componentes, sino que además reducirá la frecuencia de

intervenciones correctivas y, lo más importante, contribuirá a mantener condiciones seguras para los trabajadores, evitando riesgos asociados a fallas estructurales por corrosión avanzada.

Refuerzo de zonas de soldadura y puntos de unión comprometidos en prensas

Durante las inspecciones realizadas en las prensas se detectaron algunas con indicios de debilitamiento en soldaduras estructurales y puntos de unión, principalmente asociados a la acción combinada de esfuerzos mecánicos cíclicos y procesos de corrosión activa. Se propone ejecutar un refuerzo estructural en las zonas afectadas, lo que implica el saneamiento del material deteriorado, la reposición de cordones de soldadura mediante procedimiento calificado (WPS) y la eventual aplicación de placas de refuerzo donde sea necesario. Posteriormente, se debe aplicar un sistema de recubrimiento anticorrosivo en las áreas intervenidas y realizar una inspección dimensional y superficial post-soldadura para verificar la correcta ejecución. De esta forma se permitirá recuperar la resistencia mecánica de los elementos estructurales, prevenir deformaciones progresivas y reducir el riesgo de fallas estructurales asociadas a fatiga y corrosión, aportando así a la continuidad operativa.

2.4.2 Deterioro prematuro de componentes y aceite hidráulico

Instalación de un sistema de enfriamiento para el aceite hidráulico

Con base en los resultados obtenidos a través del análisis causa-raíz (ACR), se identificó que gran parte de las fallas están vinculadas a un factor común: el exceso de temperatura en el circuito hidráulico. Este problema ha generado daños reiterados en componentes como mangueras hidráulicas, sellos y partes internas de la bomba, acelerando su desgaste y reduciendo su vida útil operativa. Ante esta situación, se propone la incorporación de un intercambiador de calor en el circuito hidráulico de cada una de las prensas actualmente operativas. Esta medida permitiría controlar de forma efectiva la temperatura del aceite, abordando de manera directa la causa principal que afecta a múltiples componentes. Su implementación contribuiría significativamente a reducir los costos asociados al mantenimiento correctivo, mejorar la disponibilidad de los equipos y aumentar la mantenibilidad del sistema hidráulico en el área de prensado.

Capacitación en el almacenamiento del aceite

Durante las inspecciones realizadas en planta, se constató la ausencia de una cultura adecuada respecto al almacenamiento y manipulación del aceite hidráulico. Se observaron

situaciones en las que el bin de almacenamiento desde el cual se abastece a las prensas permanecía sin su tapa, lo que facilita la entrada de partículas contaminantes que comprometen la calidad del fluido y dañan los componentes del sistema hidráulico. Del mismo modo, se detectó que los estanques de las prensas se encontraban destapados después del proceso de relleno, o directamente sin sus tapas debido a extravíos. Como medida correctiva, se propone la capacitación del personal operativo en buenas prácticas de almacenamiento, manipulación y control de contaminación del aceite hidráulico. Asimismo, se recomienda la instalación de tapas seguras en los estanques de las prensas, equipadas con sistemas de cierre a los que solo tenga acceso el equipo de mantenimiento, con el fin de evitar manipulaciones indebidas y pérdidas de componentes.

Establecer un plan de mantenimiento para el circuito hidráulico de las prensas

Actualmente, el circuito hidráulico de las prensas opera bajo un esquema principalmente correctivo, sin un plan estructurado de mantenimiento preventivo que permita anticipar fallas o extender la vida útil de los componentes críticos. Se propone diseñar e implementar un plan de mantenimiento preventivo específico para el sistema hidráulico, basado en parámetros como horas de operación, condiciones de trabajo y registros históricos de fallas. El plan debe incluir tareas periódicas como inspección visual de componentes, revisión de presión y temperatura, control de fugas, análisis de aceite (conteo de partículas y presencia de agua), recambio programado de filtros y verificación del estado de conexiones y sellos. La aplicación de este plan contribuirá a aumentar la confiabilidad del sistema, reducir las paradas no programadas, optimizar los costos de mantenimiento.

Creación de protocolos post-intervención a componentes

Actualmente, las intervenciones externalizadas realizadas sobre componentes críticos, como el vástago del cilindro hidráulico de una prensa, carecen de un procedimiento estandarizado que permita verificar la calidad de las reparaciones efectuadas. Esto ha derivado en soluciones ineficientes que no resuelven adecuadamente los daños originales, generando reincidencias y pérdida de confiabilidad. Se propone la elaboración de un protocolo técnico post-intervención para todos los componentes reparados por proveedores externos, el cual debe contemplar inspecciones visuales, pruebas funcionales, verificaciones dimensionales, y, cuando corresponda, la aplicación de ensayos no destructivos como ultrasonido o líquidos penetrantes. Este protocolo debe ser ejecutado por personal de mantenimiento calificado y documentado como parte del historial técnico del equipo, asegurando la trazabilidad de las acciones realizadas y de las personas involucradas. La implementación de este procedimiento permitirá elevar el

estándar técnico del mantenimiento, disminuir la cantidad de fallas recurrentes y garantizar la calidad de las reparaciones contratadas externamente.

CAPÍTULO 3: EVALUACION TÉCNICA Y ECONÓMICA

3 EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

A continuación, se desglosa el costo estimado de implementación de cada una de las propuestas de mejora presentadas en el capítulo anterior. Estos valores permiten dimensionar la inversión inicial requerida para atacar las causas raíz identificadas.

3.1 EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

3.1.1 **Diseño e implementación de un plan de mantenimiento preventivo estructural**

Item	Costo estimado (CLP)
Elaboración de plan preventivo (Externalizado)	\$ 1,200,000
Capacitación técnica para personal interno (trimestral)	\$ 600,000
Instrumentación básica (medidor de espesores por ultrasonido)	\$ 850,000
Digitalización y sistema de seguimiento interno (formato informes + Drive/Milanote)	\$ 400,000
Total	\$ 3,050,000

Figura 3-1. Costos estimados de implementación de un plan de mantenimiento preventivo

Impacto técnico esperado

Se estima que esta medida permitirá una reducción del 50 % en las fallas estructurales recurrentes, junto con una mejora en la confiabilidad mecánica de las estructuras del área de prensado. La implementación de rutinas de inspección también facilitará un control del avance de la corrosión, permitiendo intervenir antes de que se alcance un nivel crítico de deterioro. Además, al detectar oportunamente zonas debilitadas, se espera un aumento en la mantenibilidad y en la capacidad de planificación de intervenciones.

Dado su bajo costo y alto retorno operativo, esta propuesta presenta una alta factibilidad de implementación. No obstante, su efectividad estará condicionada al compromiso organizacional con el seguimiento interno y la ejecución del plan.

3.1.2 Reemplazo de perfiles estructurales

Item	Costo estimado (CLP)
Retiro de rieles y plataformas existentes (mano de obra y corte)	\$ 1,800,000
Suministro de perfiles en acero galvanizado/inoxidable (según espesor y sección)	\$ 7,800,000
Instalación y montaje estructural (soldadura, fijaciones)	\$ 4,200,000
Aplicación de recubrimiento anticorrosivo (pintura, mano de obra)	\$ 1,300,000
Inspección post montaje (dimensional, visual)	\$ 400,000
Costos logísticos y traslados (retiro y acopio seguro de estructuras)	\$ 400,000
Total	\$ 15,900,000

Figura 3-2. Costos estimados de reemplazo de perfiles estructurales

Impacto técnico esperado

Se estima una reducción de al menos un 60 % en la frecuencia de intervenciones correctivas estructurales, gracias a la incorporación de materiales de mayor durabilidad y sistemas de protección anticorrosiva, con un plan de mantenimiento adecuado, se espera que la vida útil de las estructuras renovadas supere los 8 años, aportando además mejoras en las condiciones de seguridad para el personal que opera en las plataformas. Su factibilidad es moderada, ya que esto implica una inversión significativa, pero desde el punto de vista técnico es una intervención directa y de baja complejidad. Puede implementarse por etapas, priorizando las zonas con mayor nivel de deterioro, lo que facilita su ejecución sin comprometer la operación general de la planta.

3.1.3 Refuerzo de zonas de soldadura y puntos de unión comprometidos en prensas

Item	Costo estimado (CLP)
Inspección técnica de soldaduras existentes (visual + líquidos penetrantes)	\$ 800,000
Limpieza y saneamiento de material comprometido (esmerilado, cepillado)	\$ 600,000
Aplicación de soldaduras reforzadas (cordones nuevos en zonas críticas)	\$ 1,500,000
Colocación de placas de refuerzo estructural en uniones seleccionadas	\$ 900,000
Aplicación de recubrimiento anticorrosivo posterior a la intervención	\$ 600,000
Supervisión técnica y control dimensional final	\$ 400,000
Total	\$ 4,800,000

Figura 3-3. Costos estimados de refuerzos de soldadura y puntos críticos

Impacto técnico esperado

Se estima una reducción de al menos un 40 % en la frecuencia de fallas estructurales, basada en la aplicación de refuerzos localizados en zonas críticas identificadas a través de inspecciones técnicas. Esta intervención permitirá prevenir deformaciones progresivas, extender la vida útil de las estructuras sin necesidad de reemplazo total, y elevar el estándar técnico del mantenimiento estructural mediante procedimientos calificados. La propuesta presenta una alta factibilidad, con una complejidad técnica moderada. Puede ser ejecutada por personal interno capacitado o bien externalizada a especialistas, sin requerir una detención total de la operación, especialmente si se coordina con otros trabajos de mantenimiento estructural planificados.

3.1.4 Instalación de un sistema de enfriamiento para el aceite hidráulico

Item	Costo estimado (CLP)
Intercambiador de calor aire-aceite	\$ 912,000
Ingeniería e integración al circuito existente (conexiones, válvulas, soporte)	\$ 1,300,000
Instalación y pruebas operacionales en cada prensa	\$ 900,000
Capacitación básica al personal para operación y monitoreo del sistema	\$ 300,000
Capacitación básica al personal para operación y monitoreo del sistema	\$ 700,000
Total	\$ 4,112,000

Figura 3-4. Costos estimados de implementación de un sistema de enfriamiento

Impacto técnico esperado

Se estima una reducción de al menos 70% en la frecuencia de fallas asociadas a sobretemperatura en el circuito hidráulico, incluyendo daños en sellos, mangueras y componentes internos de la bomba, La instalación del intercambiador permitirá mantener la temperatura del aceite dentro de rangos óptimos de operación, aumentando la vida útil de sellos y mangueras de 1–2 meses a periodos superiores a 7 meses, reduciendo el deterioro prematuro del aceite hidráulico y los recambios de fluido por fugas o contaminación, disminuyendo el gasto total de aceite necesitado contribuyendo a un ahorro en los costos del mantenimiento, Su factibilidad es alta, con una complejidad técnica moderada, fácilmente abordable con recursos internos del equipo de mantenimiento, es una inversión altamente costo-efectiva, considerando la magnitud de daños que previene. Además, la implementación se puede llevar por etapas sin afectar el funcionamiento general del área de prensado.

3.1.5 Capacitación en el almacenamiento del aceite

Item	Costo estimado (CLP)
Diseño de plan de capacitación en manejo y almacenamiento de aceites hidráulicos	\$ 400,000
Jornada de capacitación presencial para operadores y personal de mantenimiento	\$ 450,000
Material didáctico y visual (impresos y presentaciones)	\$ 150,000
Implementación de sistema de cierre seguro en estanques de aceite	\$ 180,000
Adquisición de tapas especiales con seguro mecánico o llave	\$ 60,000
Total	\$ 1,240,000

Figura 3-5. Costos estimados de capacitación del personal para el almacenamiento de aceite

Impacto técnico esperado

Se estima una reducción de al menos un 50 % en la contaminación del aceite hidráulico por partículas externas, lo que permitirá prevenir daños en componentes del sistema hidráulico, extender la vida útil del fluido y reducir la frecuencia de fallas derivadas de la degradación del aceite. Además, esta medida contribuirá a fortalecer la conciencia técnica del personal respecto al almacenamiento y manipulación adecuada del lubricante. La propuesta presenta una alta factibilidad, ya que implica una intervención de bajo costo y sencilla ejecución técnica, que puede ser implementada con recursos internos. Su efectividad, sin embargo, dependerá del compromiso organizacional y del seguimiento continuo por parte del área de mantenimiento.

3.1.6 Establecer un plan de mantenimiento para el circuito hidráulico de las prensas

Item	Costo estimado (CLP)
Diseño del plan de mantenimiento (frecuencias, tareas, puntos de control)	\$ 700,000
Capacitación del personal en inspección y ejecución del plan	\$ 500,000
Implementación de registros de mantenimiento (formato digital y trazabilidad)	\$ 300,000
Instrumentación básica (termómetro, presostato, herramientas de verificación)	\$ 850,000
Pruebas piloto y ajustes iniciales del plan durante el primer trimestre	\$ 350,000
Total	\$ 2,700,000

Figura 3-6. Costos estimados de implementación de un plan de mantenimiento de circuito hidráulico

Impacto técnico esperado

Se estima una reducción de al menos un 50 % en las fallas asociadas al sistema hidráulico mediante la implementación de un plan de mantenimiento preventivo basado en horas de operación y condiciones reales de trabajo. Esta medida permitirá anticipar desgastes, fugas y anomalías funcionales en el circuito, favoreciendo la extensión de la vida útil del fluido hidráulico y sus componentes críticos. Además, contribuirá a mejorar la trazabilidad y el control de las actividades de mantenimiento, mediante registros y rutinas establecidas. La propuesta presenta una alta factibilidad, pudiendo ejecutarse con recursos internos y apoyo técnico puntual, sin necesidad de interrumpir la operación. Su efectividad dependerá del cumplimiento del cronograma y de una gestión activa de los datos registrados.

3.1.7 Creación de protocolos post-intervención estructural

Item	Costo estimado (CLP)
Diseño y redacción de protocolo técnico (inspección, pruebas, criterios de aceptación)	\$ 600,000
Capacitación al equipo de mantenimiento en aplicación del protocolo	\$ 500,000
Instrumentación mínima para ensayos no destructivos básicos (kit líquidos penetrantes, galgas, etc.)	\$ 450,000
Documentación y registro digital de resultados (plantilla de informes + respaldo en sistema)	\$ 250,000
Supervisión inicial y auditoria de cumplimiento en primeras 3 aplicaciones	\$ 400,000
Total	\$ 2,200,000

Figura 3-7. Costos estimados de creación de protocolos post-intervención

Impacto técnico esperado

Se estima una reducción de al menos un 50% en la reincidencia de fallas estructurales causadas por reparaciones deficientes, mediante la aplicación de un protocolo técnico estandarizado posterior a cada intervención. Esto permitirá asegurar la calidad de las reparaciones efectuadas, tener una trazabilidad técnica de los procesos, y elevar el estándar general del mantenimiento estructural, incorporando inspecciones, verificaciones funcionales y ensayos no destructivos básicos cuando sea necesario. Se presenta una alta factibilidad, con una complejidad técnica baja, y puede ser implementada con recursos internos capacitados. No requiere interrupciones operativas y puede aplicarse de forma gradual, integrándose como parte de los procedimientos normales del área de mantenimiento.

3.2 EFECTIVIDAD DE LAS SOLUCIONES

Esta empresa aún no ha alcanzado un nivel de madurez adecuado en la gestión del mantenimiento, persistiendo en paradigmas arraigados que consideran al mantenimiento como un costo inevitable, y no como una herramienta estratégica para garantizar la continuidad operativa, la seguridad y la eficiencia. Este enfoque reactivo, centrado exclusivamente en la corrección de fallas una vez ocurridas, limita gravemente la capacidad de la organización para anticiparse a los problemas y optimizar sus recursos.

En este contexto, la implementación de nuevas metodologías, técnicas y propuestas de mejora no basta con demostrar su viabilidad técnica; es fundamental sustentar su impacto a nivel económico y organizacional. Por ello, además del análisis técnico, se ha desarrollado una evaluación cuantitativa de los costos asociados a las soluciones planteadas, permitiendo estimar el retorno esperado y justificar su aplicación desde una perspectiva costo-beneficio.

Los resultados obtenidos confirman que la aplicación de las soluciones propuestas no solo es técnicamente factible, sino que representa una decisión económicamente conveniente. Su implementación contribuiría a una disminución significativa del riesgo operacional, reduciría la frecuencia de fallas críticas, mejoraría la trazabilidad del mantenimiento y permitiría avanzar hacia una gestión más estratégica y eficiente.

#	Costos de la recomendación	Frecuencia de eventos por año fallas/año (promedio)	TPPR horas (promedio)	Imp. Prod. \$/hora (promedio)	Costos directos por falla \$/falla (promedio)	Riesgo \$/año (promedio)	Número de años de la recomendación	Costos de la recomendación anualizada	Beneficios esperados del cambio por año \$/año
1.1	\$ 6,316,700	4	5	\$ 2,625,000	\$ 468,800	\$ 54,375,200	3	\$ 2,105,567	\$ 181,249,233
2.1	\$ 6,316,700	2	6	\$ 2,625,000	\$ 625,500	\$ 32,751,000	3	\$ 2,105,567	\$ 73,373,433
3.1	\$ 11,116,700	2	32	\$ 2,625,000	\$ 1,780,000	\$ 171,560,000	3	\$ 3,705,567	\$ 253,334,433
TOTAL								\$ 7,916,700	\$ 507,957,100

Figura 3-8. Escenario futuro estimado, Problemática de Corrosión en las estructuras y equipamiento

#	Costos de la recomendación	Frecuencia de eventos por año fallas/año (promedio)	TPPR horas (promedio)	Imp. Prod. \$/hora (promedio)	Costos directos por falla \$/falla (promedio)	Riesgo \$/año (promedio)	Número de años de la recomendación	Costos de la recomendación anualizada	Beneficios esperados del cambio por año \$/año
1.1	\$ 1,816,000	2	4	\$ 2,625,000	\$ 585,000	\$ 22,170,000	3	\$ 605,333	\$ 107,340,667
2.1	\$ 1,816,000	2	3	\$ 2,625,000	\$ 626,250	\$ 17,002,500	3	\$ 605,333	\$ 59,360,917
3.1	\$ 1,816,000	2	1	\$ 2,625,000	\$ 249,750	\$ 5,749,500	3	\$ 605,333	\$ 10,893,667
4.1	\$ 1,816,000	1	6	\$ 2,625,000	\$ 368,750	\$ 16,118,750	3	\$ 605,333	\$ 29,215,917
5.1	\$ 2,988,000	1	40	\$ 2,625,000	\$ 2,537,500	\$ 107,537,500	3	\$ 996,000	\$ 25,316,500
TOTAL								\$ 3,417,333	\$ 232,127,667

Figura 3-9. Escenario futuro estimado, Problemática de Deterioro prematuro de componentes y aceite hidráulico

Durante el desarrollo de la evaluación económica de las soluciones propuestas, se identificó que varias recomendaciones técnicas impactaban directamente sobre múltiples modos de falla o componentes del sistema, tal como ocurre, por ejemplo, con la instalación del sistema de enfriamiento del aceite hidráulico, que beneficia tanto a sellos, mangueras, bomba, cilindro y al propio fluido. Con el objetivo de no sobredimensionar el costo individual de cada solución y reflejar de manera más justa el impacto económico de la implementación, se optó por aplicar un criterio de asignación proporcional del costo de cada recomendación.

Esto se traduce en que, cuando una misma acción correctiva o preventiva influye positivamente sobre varios modos de falla, su costo total fue distribuido entre ellos, en función del número de componentes beneficiados. Así se evita duplicar los valores y se mantiene la coherencia económica del análisis.

Además, este método entrega una representación más realista de cómo una inversión única como la implementación de un intercambiador de calor o la creación de protocolos estandarizados puede generar beneficios transversales en la operación, afectando positivamente múltiples KPIs y reduciendo los costos totales de mantenimiento.

CONCLUSIÓN

El presente trabajo permitió abordar de forma estructurada y técnica los principales problemas que afectan la operación del área de prensado en la planta, mediante la aplicación de la metodología de Análisis Causa-Raíz (ACR). Esta metodología facilitó no solo la identificación de los modos de falla más críticos, sino también la validación o descarte de hipótesis asociadas a cada uno de ellos, permitiendo revelar con claridad las causas físicas, humanas y latentes que los originan.

A través del desarrollo del ACR se pudo establecer que las dos problemáticas principales la corrosión estructural de componentes clave y el deterioro prematuro del sistema hidráulico tienen como origen común la falta de una gestión de mantenimiento preventiva, estructurada y alineada con los requerimientos técnicos reales de la operación. Además, se evidenció que muchas de las decisiones operativas tomadas por la jefatura en función de reducir costos a corto plazo han derivado en efectos contraproducentes, con un aumento sostenido del riesgo operacional, la pérdida de confiabilidad y el deterioro acelerado de componentes.

La validación de las causas permitió desarrollar un conjunto de soluciones técnicas y organizacionales realistas y factibles, que fueron evaluadas tanto desde el punto de vista técnico como económico. Se proyectaron mejoras sustanciales en mantenibilidad, reducción de la frecuencia de fallas, tiempo promedio de reparación (TPPR) y costos directos asociados. La implementación de estas soluciones, además, permitiría aumentar la disponibilidad operacional de los equipos, asegurar mejores condiciones de seguridad para el personal, y establecer un marco de control y trazabilidad sobre las acciones de mantenimiento.

Se concluye que las propuestas planteadas no solo son necesarias, sino también económicamente viables. Su adopción representa una oportunidad concreta para transitar desde un modelo correctivo y reactivo hacia uno preventivo, basado en la mejora continua, en el monitoreo técnico riguroso y en decisiones estratégicas informadas. Finalmente, se recomienda que este trabajo sirva como base para instaurar una cultura organizacional que valore al mantenimiento como una inversión crítica para la sustentabilidad operativa y económica de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

Instituto Nacional de Normalización. (1999). *NCh-ISO 55000: Gestión de activos – Principios generales*. INN Chile.

Ministerio de Salud de Chile. (1999). *Decreto Supremo N° 594: Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo*. Diario Oficial de la República de Chile.

Instituto Nacional de Normalización. (2006). *NCh1258: Prevención de riesgos – Señalización, colores y formas*. INN Chile.

Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Butterworth-Heinemann.

Levitt, J. (2009). *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

Smith, R. & Hawkins, B. (2004). *Lean Maintenance: Reduce Costs, Improve Quality, and Increase Market Share*. Elsevier.

Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems Engineering and Analysis* (5th ed.). Pearson Education.

Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2006). *Practical Machinery Management for Process Plants: Volume 1 – Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Gulf Professional Publishing.

Arata, J., & Costa, R. (2016). *Gestión del mantenimiento: Enfoques, estrategias y herramientas*. Ediciones UNSAM.

Murphy, W., & Smith, R. (1995). *RCM—Reliability-Centered Maintenance*. McGraw-Hill.

Kelly, A. & Harris, M. (1978). *Management of Industrial Maintenance*. Newnes-Butterworths.

OIT (Organización Internacional del Trabajo). (2012). *Guía para la implementación del TPM (Total Productive Maintenance)*. OIT, Departamento de Empresas.

Cordero, F., Bustamante, J., Reyes, C., & González, L. (2022). *Análisis causa-raíz en chancador VSI y evaluación económica de propuestas de mantenimiento*. Universidad Técnica Federico Santa María. (Trabajo de titulación base, proporcionado por el profesor guía).

Proveedora Industrial S.A. (2024). *Cotización N° 18092 – Intercambiador de calor aire-aceite para sistema hidráulico de prensas*. Documento interno proporcionado para análisis económico.

Manual técnico del fabricante – prensas hidráulicas de la planta. (2021). Documento interno. Área de mantenimiento.