

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL PARA
SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVE CON DEPÓSITO EN
SECO EN POLPAICO SOLUCIONES S.A.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

ROBERTO ANDRES FUENZALIDA VALLEJOS

PROFESOR GUÍA

DR. FREDY ARIEL KRISTJANPOLLER RODRIGUEZ

VALPARAÍSO, OCTUBRE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL PARA SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVE CON DEPÓSITO EN SECO EN POLPAICO SOLUCIONES S.A.

Nombre del candidato(a): Roberto Andres Fuenzalida Vallejos

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa Central Valparaiso ; Departamento: Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Fredy Ariel Kristjanpoller Rodriguez, en mi calidad de profesor guía 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: 23/09/2025 ; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23/09/2025 ; 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.



Tabla de Contenido

1.	Agradecimientos	10
2.	Resumen.....	11
3.	Abstract.....	12
4.	Industria del Cemento	13
4.1.	La Industria Cementera Internacional.....	13
4.2.	La Industria Cementera en América Latina.	14
4.3.	La Industria Cementera en Chile.	15
4.4.	Planta Cerro Blanco y Proceso de producción.....	16
4.5.	Importancia del agua en el proceso de producción del cemento	18
5.	Problema de investigación	19
6.	Objetivos.....	21
6.1.	Objetivo General.....	21
6.2.	Objetivos Específicos.....	21
7.	Marco teórico	22
7.1.	Normativa Chilena para el Manejo de Relaves.....	22
7.1.1.	Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300)	22
7.1.2.	Decreto Supremo N° 248.....	22
7.2.	Conceptos del Mantenimiento	23
7.2.1.	Definición de Mantenimiento	23



7.2.2.	Importancia del Mantenimiento en Industrias	24
7.2.3.	Tipos de Mantenimiento	24
7.2.3.1.	Mantenimiento Preventivo.....	24
7.2.3.2.	Mantenimiento Correctivo	25
7.2.3.3.	Mantenimiento Predictivo.....	25
7.2.3.4.	Mantenimiento Proactivo.....	25
7.2.4.	Inspección sensitiva y metodología VOSO en mantenimiento predictivo ..	26
7.2.4.1.	Metodología VOSO	26
7.2.4.2.	Beneficios y aplicaciones en plantas nuevas	27
7.2.5.	Criterios de Planificación del Mantenimiento	28
7.2.6.	Evaluación de la Criticidad de los Equipos	28
7.2.7.	Importancia del MTBF y MTTR en la Evaluación de Criticidad	29
7.2.8.	Análisis de Criticidad.....	29
7.2.8.1.	Proceso de Realización del Análisis de Criticidad.....	30
7.2.8.2.	Métodos para Asignar Niveles de Criticidad	30
7.2.9.	Uso del RBD (Reliability Block Diagram).....	31
7.2.10.	Presupuesto y Recursos.....	31
7.2.11.	Cumplimiento Normativo	31
7.3.	Metodología 5S en entornos industriales.....	32
7.4.	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)	33



7.5.	Sistemas computarizados de gestión del mantenimiento (CMMS)	34
7.5.1.	Fundamentos y funcionamiento.....	34
7.5.2.	Relación con metodologías de mantenimiento	35
7.5.3.	Aplicación y beneficios generales	35
8.	Metodología.....	37
8.1.	Definición de Objetivos y responsabilidades.....	38
8.2.	Jerarquización de los equipos de acuerdo con la importancia de función	39
8.3.	Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.....	39
8.4.	Diseño de planes de mantenimiento preventivo y de los recursos necesarios..	40
8.5.	.Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos	41
9.	Enfoque de la Investigación.....	42
10.	Presentación y Análisis de Resultados.....	43
10.1.	Resultados asociados a la definición de objetivos y responsabilidades para el sistema de mantenimiento.....	43
10.2.	Resultados del análisis cualitativo de criticidad (CTR).....	45
10.2.1.	Levantamiento de información y validación de factores de criticidad	45
10.2.2.	Clasificación general de equipos	47
10.2.3.	Identificación de equipos críticos	49
10.3.	Análisis de causa raíz (ACR) aplicado a los equipos críticos.....	50



10.3.1.	Bombas centrífugas.....	51
10.3.1.1.	Fallas mecánicas	51
10.3.1.2.	Fallas hidráulicas	52
10.3.1.3.	Fallas eléctricas.....	53
10.3.1.4.	Fallas operacionales.....	53
10.3.1.5.	Fallas en sistemas de lubricación.....	54
10.3.2.	Filtros prensa y unidad hidráulica.....	54
10.3.2.1.	Fallas en Filtros Prensa	55
10.3.2.2.	Unidad hidráulica.....	57
10.3.3.	Fallas en Espesador High Rate	59
10.3.3.1.	Fallas Mecánicas.....	59
10.3.3.2.	Fallas Hidráulicas.....	60
10.3.3.3.	Fallas Operacionales.....	60
10.3.3.4.	Fallas de Instrumentación y Control.....	61
10.3.3.5.	Fallas Eléctricas	61
10.3.3.6.	Fallas por Lubricación	62
10.4.	Análisis Modal de Efectos y Fallos	62
10.4.1.	AMEF – Bombas Centrífugas.....	63
10.4.1.1.	Fallas Mecánicas – Bombas Centrífugas	63
10.4.1.2.	Fallas Hidráulicas – Bombas Centrífugas.....	65



10.4.1.3.	Fallas Eléctricas – Bombas Centrífugas	66
10.4.1.4.	Fallas Operacionales – Bombas Centrífugas	66
10.4.1.5.	Fallas de Lubricación – Bombas Centrífugas	67
10.4.2.	AMEF Filtro Prensa y Unidad Hidráulica	68
10.4.2.1.	Fallas Mecánicas – Filtro Prensa	69
10.4.2.2.	Fallas Hidráulicas – Filtro Prensa	69
10.4.2.3.	Fallas Eléctricas – Filtro Prensa.....	70
10.4.2.4.	Fallas de Control – Filtro Prensa	71
10.4.2.5.	Fallas Mecánicas – Unidad Hidráulica	71
10.4.2.6.	Fallas Eléctricas – Unidad Hidráulica.....	72
10.4.2.7.	Fallas de Control – Unidad Hidráulica	72
10.4.3.	AMEF – Espesador High Rate.....	73
10.4.3.1.	Fallas Mecánicas – Espesador High Rate	74
10.4.3.2.	Fallas Hidráulicas – Espesador High Rate.....	74
10.4.3.3.	Fallas Operacionales – Espesador High Rate	75
10.4.3.4.	Fallas de Instrumentación y Control – Espesador High Rate	76
10.4.3.5.	Fallas Eléctricas – Espesador High Rate	76
10.4.3.6.	Fallas de Lubricación – Espesador High Rate	77
10.5.	Frecuencias y Tiempos de Ejecución del Mantenimiento en Equipos Críticos	



10.5.1.	Bombas centrífugas.....	78
10.5.2.	Filtros prensa con unidad hidráulica	80
10.5.3.	Espesador High Rate.....	83
10.5.4.	Incorporación del Inspector VOSO como complemento sensorial al plan de mantenimiento predictivo	85
10.6.	Programación del mantenimiento para equipos críticos	86
10.6.1.	Rol del Inspector VOSO como disparador predictivo	87
10.6.2.	Frecuencias programadas.....	88
10.6.3.	Ajustes dinámicos y mejora continua	89
10.7.	Programación del mantenimiento para equipos no críticos	90
10.7.1.	Integración con rondas VOSO en equipos no críticos	91
10.8.	Cronograma semestral consolidado de mantenimiento	92
11.	Recomendaciones	95
11.1.	Consideraciones para la puesta en marcha.....	95
11.2.	Implementación inicial del plan de mantenimiento	95
11.3.	Consolidación del rol del inspector VOSO.....	95
11.4.	Revisión dinámica del análisis de criticidad.....	96
11.5.	Vínculos técnicos y trazabilidad digital	96
12.	Conclusiones.....	97
13.	Anexos	99



Anexo A	99
14. Referencias.....	104

Lista de Tablas

Tabla 1. Modos de fallas mecánicas de Bombas Centrífugas.....	52
Tabla 2. Modos de fallas Hidráulicos de Bombas Centrífugas	53
Tabla 3. Modos de fallas eléctricos de Bombas Centrífugas	53
Tabla 4. Modos de fallas Operacional de Bombas Centrífugas	54
Tabla 5. Modos de fallas de lubricación de Bombas Centrífugas.....	54
Tabla 6. Modos de fallas mecánicas del Filtro Prensa.....	56
Tabla 7. Modos de fallas hidráulicos del Filtro Prensa.....	56
Tabla 8. Modos de fallas eléctricos del Filtro Prensa	57
Tabla 9. Modos de fallas de control del Filtro Prensa.....	57
Tabla 10. Modos de fallas mecánicas de Unidad Hidráulica.....	58
Tabla 11. Modos de fallas eléctricos de Unidad Hidráulica.....	58
Tabla 12. Modos de fallas de control de Unidad Hidráulica.....	59
Tabla 13. Modos de fallas mecánicas del Espesador High Rate.....	60
Tabla 14. Modos de fallas hidráulicos del Espesador High Rate.....	60
Tabla 15. Modos de fallas operacionales del Espesador High Rate.....	61
Tabla 16. Modos de fallas de instrumentación y control del Espesador High Rate.....	61
Tabla 17. Modos de fallas eléctricos del Espesador High Rate	62
Tabla 18. Modos de fallas de lubricación del Espesador High Rate.....	62
Tabla 19. Análisis de modo de falla mecánica Bombas Centrifugas	65



Tabla 20. Análisis de modo de falla hidráulicas Bombas Centrifugas.....	66
Tabla 21. Análisis de modo de falla eléctrica Bombas Centrifugas.....	66
Tabla 22. Análisis de modo de falla operacional Bombas Centrifugas.....	67
Tabla 23. Análisis de modo de falla de lubricación Bombas Centrifugas	68
Tabla 24. Análisis de modo de falla mecánica Filtro Prensa	69
Tabla 25. Análisis de modo de falla hidráulica Filtro Prensa	70
Tabla 26. Análisis de modo de falla eléctrica Filtro Prensa	70
Tabla 27. Análisis de modo de falla de control Filtro Prensa	71
Tabla 28. Análisis de modo de falla mecánica Unidad Hidráulica	72
Tabla 29. Análisis de modo de falla eléctrica Unidad Hidráulica.....	72
Tabla 30. Análisis de modo de falla de control Unidad Hidráulica	73
Tabla 31. Análisis de modo de falla mecánica Espesador High Rate	74
Tabla 32. Análisis de modo de falla hidráulica Espesador High Rate	75
Tabla 33. Análisis de modo de falla operacional Espesador High Rate.....	75
Tabla 34. Análisis de modo de falla Instrumentación y Control Espesador High Rate	76
Tabla 35. Análisis de modo de falla eléctrica Espesador High Rate.....	77
Tabla 36. Análisis de modo de falla de lubricación Espesador High Rate	77
Tabla 37. Frecuencias, tiempos de intervención y acciones de mantenimiento en Bombas Centrifugas	80
Tabla 38. Frecuencias, tiempos de intervención y acciones de mantenimiento en Filtro Prensa y Unidad Hidráulica	83
Tabla 39. Frecuencias, tiempos de intervención y acciones de mantenimiento en Espesador High Rate	85



Tabla 40. Frecuencias de Mantenimiento Programados, Equipos Críticos.....	89
Tabla 41. Frecuencia de Mantenimiento, Equipos no Críticos.	91
Tabla 42. Factores ponderados para el proceso de jerarquización.	99
Tabla 43. Matriz de criticidad propuesta en el modelo CTR.	99
Tabla 44. Aplicación del modelo de criticidad semicuantitativo CTR en la planta de tratamiento y depósito de relave.	101

Lista de Figuras

Figura 1. Metodología VOSO.....	27
Figura 2. Modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM).	37
Figura 3. Gráfico de dispersión de equipos críticos.....	48
Figura 4. Frecuencia de mantenimiento preventivo para equipos industriales.	90
Figura 5. Cronograma de mantenimiento Semestral.....	93
Figura 6. Leyenda de cronograma	93
Figura 7. Diagrama de flujos de planta de tratamiento de agua relave.....	100

1. Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo profundamente a mi familia, en especial a mi mamá, por todo el esfuerzo y sacrificio que ha hecho durante estos años. Gracias por preocuparte, por tu cariño incondicional y tu fortaleza silenciosa. A mi papá, gracias por haberme acercado desde pequeño al mundo de la industria del cemento, inspirándome y guiándome hacia el camino profesional que hoy culmino.

A mi pareja, Maria Ignacia, gracias por haber sido compañera, amiga y refugio en los momentos en que más lo necesitaba. Gracias por tu compañía constante a lo largo de todo este proceso, por estar ahí cuando me sentía decaído, abrumado por una nota o por el estrés acumulado. Tu apoyo, paciencia y cariño fueron un sostén esencial para seguir adelante.

A mi mejor amiga Anabel, gracias por ser un pilar constante durante esta etapa. Por darme siempre un espacio para desahogarme, por escucharme sin juzgar, por acompañarme en los días buenos y malos, y por estar presente incluso cuando el cansancio pesaba.

A mis compañeros de carrera y de trabajos, gracias por esas conversaciones donde no entendíamos del todo lo que pasaba, pero aun así buscábamos soluciones juntos. Por compartir sus puntos de vista, por ayudar y dejarse ayudar. Todos esos momentos también construyen lo que hoy soy.

También quiero agradecer a los amigos que formé a lo largo de mi experiencia universitaria, verdaderas amistades que nacieron entre clases, tareas, discusiones de último minuto y charlas que comenzaron en tiempos de pandemia y que se extendieron hasta hoy. Gracias por las tardes de juego, por las risas, por los silencios compartidos y por estar ahí cuando era necesario desconectar.

Agradezco a todos los compañeros de juegos, quienes me ofrecieron una vía de escape, una comunidad donde pude distraerme, compartir y sentirme acompañado en los momentos más exigentes de la carrera.

Finalmente, agradezco al profesor Fredy, quien durante la confección de esta memoria siempre estuvo dispuesto a responder dudas, revisar avances y entregar observaciones casi de inmediato. Su apoyo cercano y constante fue clave para poder finalizar este trabajo con claridad y confianza.

Gracias a todos quienes, de una u otra forma, fueron parte de este proceso. Llevo conmigo no solo lo aprendido, sino también a las personas que lo hicieron posible.

2. Resumen

La presente memoria de título tiene como objetivo diseñar un plan de mantenimiento integral para el sistema de tratamiento de aguas de relaves con depósito en seco de la empresa Polpaico Soluciones S.A., ubicado en su planta de producción de cemento en Cerro Blanco, comuna de Tiltil. Esta instalación, de reciente construcción, surge como respuesta estratégica a la condición de escasez hídrica declarada en la zona y al cierre proyectado del tranque de relaves original en 2025. El nuevo sistema, compuesto por espesador High Rate, bombas centrífugas, filtros prensa y unidades hidráulicas, permite recircular agua desde los relaves espesados y filtrados, disminuyendo el consumo de agua fresca y el impacto ambiental del proceso.

Dado que se trata de un sistema sin historial operativo previo, se elaboró un plan de mantenimiento técnico basado en metodologías modernas como el análisis de criticidad (CTR), el análisis modal de fallos y efectos (AMEF), la clasificación de equipos críticos y la incorporación de inspecciones sensoriales mediante la metodología VOSO. El proceso fue complementado con herramientas de confiabilidad como el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y el uso proyectado de un sistema CMMS para trazabilidad operativa.

Los resultados obtenidos permitieron jerarquizar 57 equipos, identificando 14 activos críticos que concentraban el mayor riesgo operacional. Se definieron estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo específicas para estos equipos, estableciendo frecuencias de intervención, tareas técnicas recomendadas y estimaciones de recursos requeridos. Además, se desarrolló un cronograma semestral de mantenimiento y una matriz de criticidad funcional.

Con ello, se cumplió el objetivo de diseñar un plan de mantenimiento integral, técnico y preventivo, que permite garantizar la confiabilidad operativa del sistema, minimizar riesgos y asegurar su sostenibilidad en el tiempo.

3. Abstract

This undergraduate thesis aims to design a comprehensive maintenance plan for the filtered tailings treatment system with dry stacking implemented by Polpaico Soluciones S.A. at its cement production plant located in Cerro Blanco, Tiltil. This recently built facility was developed as a strategic response to the water scarcity declared in the region and the planned closure of the existing tailings dam by 2025. The new system, which includes a high-rate thickener, centrifugal pumps, filter presses, and hydraulic units, enables water recirculation from thickened and filtered tailings, reducing freshwater consumption and minimizing environmental impact.

Given the absence of operational history for the system, a technical maintenance plan was developed based on modern methodologies such as the risk-based criticality analysis (CTR), failure mode and effects analysis (FMEA), equipment criticality classification, and the inclusion of sensory inspections through the VOSO methodology. The plan was further strengthened by incorporating reliability-centered maintenance (RCM) principles and the projected use of a CMMS platform for operational traceability.

The analysis prioritized 57 equipment units, identifying 14 critical assets that concentrated the highest operational risk. Specific preventive and predictive maintenance strategies were defined for these components, including technical tasks, intervention frequencies, and estimated resource requirements. A semiannual maintenance schedule and a functional criticality matrix were also developed.

As a result, the proposed plan provides a structured, technically grounded maintenance strategy that supports operational reliability, minimizes equipment failure risks, and aligns with sustainability and regulatory compliance goals.

4. Industria del Cemento

4.1. La Industria Cementera Internacional.

El cemento es uno de los materiales fundamentales para la industria de la construcción, siendo, junto con el agua, de los más utilizados a nivel global. Entre 1995 y 2022, la producción mundial de cemento ha mostrado un crecimiento significativo, pasando de alrededor de 1.400 millones de toneladas métricas en 1995 a más de 4.000 millones en 2022, reflejando la expansión del sector constructivo. China se destaca como el mayor productor mundial, alcanzando más de 2.000 millones de toneladas métricas en 2022, una cifra que supera ampliamente la producción combinada de países como India, Vietnam y Estados Unidos, lo que subraya la escala de su industria cementera. (Queirel, 2023)

Es por lo que el crecimiento de este mercado está impulsado principalmente por la expansión de la construcción de edificios, carreteras, puentes y otras infraestructuras, lo cual es fundamental para satisfacer la creciente demanda derivada de factores como el aumento de la población, la urbanización, las inversiones gubernamentales en infraestructuras y la influencia de las regulaciones ambientales.

El mercado mundial de cemento y agregados alcanzó un tamaño de 209,4 mil millones de dólares en 2023 y se espera que llegue a 263,9 mil millones de dólares para 2032, con una tasa de crecimiento anual del 2,6% durante el período de pronóstico. Este mercado forma una parte esencial de la industria de la construcción global, debido al uso de cemento como aglutinante en concreto y mortero, y de agregados como arena, grava y piedra triturada (Business Research Insights, 2024)

Dado a lo anterior hay que ver los participantes de esta industria en América Latina.

4.2. La Industria Cementera en América Latina.

América Latina ha jugado un papel significativo en la producción global de cemento, con países como México, Brasil y Colombia encabezando el volumen de producción en la región. En 2023, el mercado latinoamericano de cemento alcanzó un volumen total de 122,66 millones de toneladas, destacando la importancia de estos países en la industria regional (Claight Corporation, s.f.). Brasil y México son los mayores productores, con niveles de producción que respaldan los grandes proyectos de infraestructura y construcción que se desarrollan en sus territorios.

En México, la demanda de cemento ha sido impulsada por las inversiones en proyectos de vivienda y las políticas gubernamentales enfocadas en mejorar la infraestructura vial y urbana. En 2023, hubo un aumento considerable en la demanda de infraestructura, incluidas naves industriales, parques y bodegas de almacenamiento, lo que contribuyó al incremento del consumo de cemento en el país (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2024). Este crecimiento ha sido una respuesta a las políticas de inversión en infraestructura que buscan mejorar la conectividad y apoyar el crecimiento urbano sostenido en varias regiones del país.

Mientras tanto, en Brasil, el auge en los sectores de la construcción y el petróleo ha contribuido significativamente al aumento de la demanda de cemento, haciéndolo uno de los mercados más dinámicos de la región. En 2024, el sector extractivo brasileño experimentó un crecimiento del 1%, impulsado en gran parte por la actividad en la industria petrolera, lo que ha estimulado la demanda de materiales de construcción como el cemento (Nodal, 2024). Esto refuerza el papel del cemento como un insumo clave en los proyectos de infraestructura energética y de vivienda, especialmente en las regiones vinculadas a la producción de petróleo.

Colombia, por su parte, ha mostrado un crecimiento notable en su capacidad de producción, alcanzando un total de 5.8 millones de toneladas en 2023. Esto ha sido posible gracias a empresas como Argos, que reportó máximos históricos de producción y se ha posicionado como un líder en la región (Donoso, 2024).

Finalmente se nombrará el país en donde se ubica la empresa a tratar.

4.3. La Industria Cementera en Chile.

Aunque Chile no es uno de los mayores productores de cemento en América Latina, ha logrado mantenerse competitivo en el mercado gracias a su enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia productiva. La industria cementera chilena ha experimentado una demanda fluctuante en los últimos años debido a la desaceleración del sector de la construcción. En 2023, el mercado de la construcción en Chile alcanzó un valor de 32.1 mil millones de dólares, pero se ha visto afectado por la paralización de proyectos de infraestructura y vivienda, lo que ha reducido la demanda de cemento (Claight Corporation, s.f.).

En 2023, Melón S.A. reportó una reducción significativa en la demanda de cemento debido al debilitamiento del sector de la construcción, lo que afectó sus ventas. Melón cerró el año enfrentando una fuerte competencia y una disminución en el volumen de ventas, principalmente afectada por la falta de nuevos proyectos de construcción de gran envergadura. A pesar de este desafío, la empresa ha continuado con una estrategia centrada en la innovación y la mejora continua de sus procesos productivos, apostando por la reducción de su impacto ambiental. Melón ha implementado el uso de energías renovables en sus operaciones y ha optimizado el uso del agua para disminuir su huella de carbono, lo que la convierte en un referente de sostenibilidad dentro de la industria cementera chilena (Melón S.A., 2024)

Por otro lado, Polpaico S.A. también ha enfrentado dificultades similares en 2023, con una caída en las ventas de cemento del 19.3% en comparación con 2022. La empresa vendió un total de 1,637,770 toneladas de cemento durante el año (Memoria Anual Integrada 2023, pág. 28), mientras que las ventas de concreto disminuyeron un 19.7%. Estos resultados reflejan el impacto negativo de la desaceleración de la construcción en Chile, lo cual contribuyó a que Polpaico registrara pérdidas significativas. (ICR Newsroom, 2024) A pesar de estos resultados negativos, Polpaico ha centrado sus esfuerzos en soluciones innovadoras para mantenerse competitiva. A través de su división Polpaico Soluciones, la empresa ha implementado programas de gestión de residuos y ofrece asesorías especializadas para ayudar a mejorar la eficiencia industrial y reducir el impacto ambiental en sus operaciones y las de sus clientes (Polpaico Soluciones S.A, s.f.).

Dado a la mención de la empresa a trabajar, es importante la planta productiva donde se implementará esta medida y el proceso que realiza para producir el cemento.

4.4. Planta Cerro Blanco y Proceso de producción

La planta Cerro Blanco es la principal fuente de producción de cemento para Polpaico Soluciones S.A., ya que cuenta con el proceso productivo completo, desde la extracción de materias primas hasta el despacho del producto final.

La historia de la planta Cerro Blanco está profundamente ligada a los orígenes de la empresa, pues fue en esta ubicación donde todo comenzó. A lo largo de los años, la planta ha evolucionado implementando mejoras tecnológicas y de sostenibilidad, optimizando los procesos productivos. Esto incluye prácticas orientadas a la gestión eficiente del agua y la reducción de residuos, fundamentales para enfrentar los desafíos ambientales actuales.

Tal como se habla en la página oficial de Polpaico (¿Cómo se hace el cemento?) y lo hablado con el jefe de Proyectos (Neira, 2024), el proceso productivo en Cerro Blanco comienza con la explotación de caliza en un yacimiento a rajo abierto. Este material es transportado a la planta, donde se somete a una trituración primaria y secundaria, reduciendo su tamaño para adecuarlo a las fases posteriores. El material triturado se almacena en el Stock-Pile, que está cubierto por una cúpula diseñada para evitar la contaminación ambiental.

La fase de concentración se compone de tres etapas: molienda húmeda, flotación y espesamiento. En la molienda, la caliza se reduce hasta obtener una granulometría adecuada, mientras que la flotación separa el carbonato de calcio, incrementando su concentración. Finalmente, en los espesadores, el material se concentra en una pasta que luego se mezcla con componentes correctivos para preparar la producción de clínker.

La producción de clínker comienza con la filtración, que reduce la humedad de la pasta antes del secado. El material se precalienta y luego se introduce en un horno rotatorio, donde se somete a temperaturas de hasta 1500°C para producir clínker. Este material se enfría rápidamente y se almacena para la siguiente fase.

En la molienda de cemento, el clínker se mezcla con yeso y aditivos en molinos de bolas, produciendo diferentes tipos de cemento. Finalmente, el cemento se almacena en silos según su clasificación, listo para ser ensacado o despachado a granel.

Dado a lo anterior, se observa que el agua está presente dentro del proceso productivo, por esto se destacara su importancia.

4.5. Importancia del agua en el proceso de producción del cemento

Como se observa en el proceso descrito, durante la fase de concentración se identifican tres etapas clave: molienda húmeda, flotación y espesamiento. Estas etapas tienen como objetivo mejorar la pureza del material extraído, que inicialmente presenta un bajo contenido de calcio debido a la naturaleza del yacimiento a cielo abierto. En la molienda húmeda, el material se reduce a un tamaño de partícula adecuado para las siguientes fases. Luego, en la flotación, se incrementa la concentración de carbonato de calcio, elevando su pureza a un promedio del 86%. Finalmente, el proceso de espesamiento permite la decantación del material, formando una pasta concentrada que se almacena para las fases posteriores. Adicionalmente, antes de la etapa de secado, se lleva a cabo un proceso de filtración para reducir el contenido de agua de la pasta proveniente de los espesadores, preparando así el material para la producción de Clinker. (Núñez, 2013)

Como bien se relacionan los nombres de las etapas nombradas como anterioridad, se ven directamente relacionados con el uso del agua, además de notar la importancia que tiene dentro del proceso productivo estas etapas ya que estas, la ley del mineral no sería la suficiente para la producción del cemento quedando inhabilitada la producción, es por esto que la empresa durante el año 2023 reportó el consumo de 617.700.000 lts y una extracción de 3.088.500.000 lts de agua (Polpaico Soluciones S.A, 2024, pág. 116), viendo así la magnitud de uso de agua dentro del proceso productivo.

5. Problema de investigación

La industria cementera en Chile enfrenta grandes desafíos en sostenibilidad y eficiencia, especialmente en la gestión de recursos hídricos. En este contexto, Polpaico Soluciones S.A., una de las principales empresas del sector, afronta un reto significativo en su planta de cemento ubicada en Tiltil, específicamente en Cerro Blanco. La extracción de caliza, materia prima clave para la producción de cemento, depende del proceso de flotación, el cual requiere grandes volúmenes de agua. Actualmente, este recurso se encuentra comprometido en la comuna, la cual fue declarada zona de escasez hídrica según el Decreto 251 (Ministerio de Obras Públicas, 2024).

La eficiente gestión del agua se ha vuelto vital para Polpaico, no solo desde una perspectiva operativa, sino también ambiental. Desde 2021, Polpaico ha enfocado su gestión en la recirculación del agua en la planta Cerro Blanco, buscando reducir el consumo de agua fresca (Polpaico Soluciones S.A., 2022). La vida útil proyectada del tranque de relaves, que almacena los residuos del proceso de flotación, está programada para finalizar en 2025, lo que pone en riesgo la continuidad de las operaciones. Para enfrentar este desafío, la empresa, en colaboración con Agora Soluciones, ha desarrollado un plan para extender la vida útil del tranque hasta 2050, que incluye la implementación de una Planta de Espesamiento y Filtrado (PEF) y el depósito de relaves filtrados (Minería Chilena, 2021).

Según el jefe de Proyectos de Polpaico, la meta de Agora Soluciones fue minimizar los costos de inversión (CAPEX) y, a través del diseño, mejorar la eficiencia hídrica a mediano plazo (Neira, 2024). Este proyecto no solo optimiza el uso del agua, sino que también mitiga el impacto ambiental y reduce la dependencia de fuentes externas. La gestión eficiente del agua es fundamental para cumplir con las normativas ambientales en Chile, especialmente en industrias

como la cementera y la minera, donde la reutilización del agua y la reducción de la extracción de fuentes naturales son prioridades.

La colaboración con Agora Soluciones, empresa consultora especializada en la preservación del medio ambiente y con amplia experiencia en el diseño e inspección técnica de proyectos de depósitos de relaves filtrados (Agora Soluciones, s.f.) es clave para el éxito de este proyecto. Su enfoque en la reducción del CAPEX y el uso de relaves secos maximiza la recuperación del agua tratada.

Un plan de mantenimiento integral y planificado es esencial para garantizar la efectividad y eficiencia del sistema de tratamiento de aguas. Según Kaizen Institute Global, "el mantenimiento planificado es un enfoque estratégico cuyo objetivo es maximizar la disponibilidad y fiabilidad de los equipos y procesos" (2023). La implementación de este sistema no solo contribuye a la sostenibilidad de las operaciones de Polpaico, sino que también puede mejorar la relación con la comunidad local, dado que la gestión eficiente de los recursos hídricos es un paso crucial hacia la responsabilidad social y ambiental.

Frente a este desafío, la presente investigación se plantea responder a las siguientes preguntas clave:

¿Cuáles son las principales causas que han llevado a Polpaico a la necesidad de implementar un sistema de tratamiento de aguas filtradas con depósito en seco?

¿Qué consecuencias podría enfrentar la empresa si no implementa un plan de mantenimiento adecuado para los equipos críticos del sistema?

¿Qué elementos técnicos, organizativos y operativos son necesarios para lograr una implementación exitosa y sostenible del plan de mantenimiento?

6. Objetivos

6.1. Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento técnico y estratégicamente planificado para la nueva planta de tratamiento de relaves de Polpaico Soluciones S.A., orientado a asegurar la confiabilidad operativa de los equipos clave para la recuperación de agua, garantizando el cumplimiento de la tasa de recuperación diseñada y extendiendo la vida útil proyectada del tranque de relaves hasta 2050.

6.2. Objetivos Específicos

Caracterizar los factores operativos, normativos y ambientales que motivan la implementación del sistema de tratamiento de aguas filtradas en Polpaico Soluciones S.A.

Aplicar un análisis de criticidad para priorizar equipos según su impacto en la recuperación de agua y la continuidad operativa.

Identificar los riesgos operacionales y ambientales derivados de la ausencia de un plan de mantenimiento estructurado para el sistema.

Definir lineamientos técnicos para el mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo de los equipos críticos del proceso.

Proponer mecanismos de monitoreo y control que aseguren el desempeño sostenido del sistema de tratamiento y recuperación hídrica.

7. Marco teórico

7.1. Normativa Chilena para el Manejo de Relaves

En Chile, la gestión de relaves está sujeta a un estricto marco normativo diseñado para minimizar los riesgos ambientales y garantizar la seguridad de las operaciones mineras e industriales. Las regulaciones más relevantes incluyen la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300) y el Decreto Supremo N° 248, que proporcionan directrices específicas para la construcción, operación y cierre de depósitos de relaves.

7.1.1. Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300)

La Ley N° 19.300 (Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia, 1994) establece los principios generales de protección ambiental en Chile, incluyendo las medidas de prevención y control de impactos ambientales generados por actividades industriales. Esta ley obliga a las empresas a implementar planes de manejo ambiental que incluyan la gestión de relaves y residuos. Las disposiciones de la ley requieren que las empresas presenten un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para evaluar los efectos potenciales de los depósitos de relaves y definir medidas de mitigación que cumplan con los estándares ambientales nacionales.

7.1.2. Decreto Supremo N° 248

El Decreto Supremo N° 248, promulgado por el Ministerio de Minería (2007), es la normativa específica que regula los tranques y depósitos de relaves en Chile. Este decreto establece los requisitos técnicos para asegurar la estabilidad física y química de los depósitos, así como su operación y monitoreo continuo. Los puntos clave incluyen:

- **Estabilidad Estructural:** El decreto exige que los depósitos sean diseñados y construidos para resistir eventos sísmicos y otras condiciones que podrían comprometer su integridad. Esta es una consideración fundamental en Chile, un país con alta actividad sísmica.
- **Monitoreo y Supervisión:** Se requiere que las empresas implementen sistemas de monitoreo continuo para evaluar la estabilidad de los depósitos y detectar posibles fallos estructurales o filtraciones.
- **Plan de Cierre:** El decreto también estipula que los operadores deben presentar un plan de cierre que incluya las medidas para dismantelar o estabilizar el depósito una vez finalizadas las actividades productivas. Esto es crucial para minimizar el impacto ambiental a largo plazo y evitar la generación de pasivos ambientales.

Continuaremos hablando de los aspectos generales como conceptos, importancia y tipos de mantenimiento.

7.2. Conceptos del Mantenimiento

El mantenimiento es una función crítica en la gestión de plantas industriales, ya que garantiza la operatividad y eficiencia de los equipos, minimizando tiempos de inactividad y costos asociados a fallos inesperados. Esta sección aborda los conceptos clave relacionados con el mantenimiento, destacando sus tipos y aplicaciones en el contexto industrial.

7.2.1. Definición de Mantenimiento

El mantenimiento se define como el conjunto de actividades destinadas a conservar o restablecer la funcionalidad de los equipos y sistemas de una planta industrial, asegurando que operen conforme a sus especificaciones originales. Según la Monografía de gestión de la planificación del proceso de mantenimiento, estas actividades incluyen desde inspecciones y

ajustes preventivos hasta reparaciones complejas (Marrero, Vilalta, García, & Iznaga, 2023, pág. 12). La definición también abarca la modernización de componentes para mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de los activos.

7.2.2. Importancia del Mantenimiento en Industrias

La importancia del mantenimiento radica en su impacto directo en la productividad, seguridad y sostenibilidad de las operaciones industriales. Una gestión adecuada del mantenimiento permite maximizar la disponibilidad de los equipos, reducir fallas y cumplir con las normativas de seguridad y medio ambiente. Como se menciona en el Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para equipos industriales, una planificación eficiente optimiza los recursos y mejora la fiabilidad operativa de la planta (Aguirre Tinitana, 2019, pág. 45).

Además, el mantenimiento contribuye a la sostenibilidad de las operaciones al reducir el consumo de energía y los residuos generados por fallos o paradas imprevistas. Este enfoque es especialmente relevante en plantas que operan con tecnologías de tratamiento de aguas y manejo de residuos, donde el buen mantenimiento garantiza la estabilidad del proceso y minimiza el impacto ambiental.

7.2.3. Tipos de Mantenimiento

Existen diferentes tipos de mantenimiento que se implementan según las necesidades de la planta y las características de sus equipos. Los más comunes incluyen:

7.2.3.1. *Mantenimiento Preventivo*

El mantenimiento preventivo se enfoca en la realización de actividades programadas para evitar fallos y asegurar el correcto funcionamiento de los equipos. Estas actividades incluyen inspecciones regulares, ajustes y reemplazo de componentes antes de que se produzca una avería.

Como señala Medina Valdivia en su estudio, el mantenimiento preventivo es fundamental para prolongar la vida útil de los activos y optimizar la producción (2021, pág. 67).

7.2.3.2. *Mantenimiento Correctivo*

Este tipo de mantenimiento se lleva a cabo cuando ya se ha producido una falla y es necesario reparar el equipo para restablecer su funcionalidad. Aunque se asocia a un costo más alto y un mayor tiempo de inactividad, es indispensable para las situaciones en las que los equipos críticos necesitan una intervención urgente (Marrero et al, 2023, pág. 20).

7.2.3.3. *Mantenimiento Predictivo*

El mantenimiento predictivo utiliza tecnologías avanzadas y sistemas de monitoreo para anticipar fallos basándose en el análisis de datos en tiempo real. En el Modelo de auditoría para evaluar la gestión de mantenimiento de activos físicos, se subraya la relevancia de implementar sensores y herramientas de análisis de condición para optimizar la planificación del mantenimiento y reducir costos operativos (Chang Parrales , 2019, pág. 29).

7.2.3.4. *Mantenimiento Proactivo*

El mantenimiento proactivo se centra en identificar y eliminar las causas raíz de las fallas para evitar su repetición. Esta metodología promueve una mejora continua y un enfoque preventivo más profundo que va más allá de las inspecciones regulares. El uso de análisis de causas y mejoras en los procesos operativos se destaca en los estudios actuales sobre gestión de activos (Marrero, Vilalta, García, & Iznaga, 2023, pág. 32) .

Finalmente se mencionarán, los aspectos generales que se deben tener en consideración al momento de hacer una planificación de mantenimiento, partiendo de como evaluar los equipos, como métodos para realizar una buena planificación

7.2.4. Inspección sensitiva y metodología VOSO en mantenimiento predictivo

La inspección sensitiva, también conocida como mantenimiento basado en condición con métodos sensoriales, es una técnica que utiliza los sentidos humanos —vista, oído, tacto y olfato— para identificar condiciones anómalas en maquinaria durante su operación, sin necesidad de detener los equipos. Esta metodología constituye una primera capa de defensa dentro del mantenimiento predictivo, permitiendo detectar fallas incipientes y programar intervenciones antes de que ocurran fallos críticos (Dynamox, 2023; Cruz, 2025).

7.2.4.1. Metodología VOSO

La metodología VOSO (o VOSO/A en algunas variantes, incluyendo “ambiente/orden”) representa una forma sistemática de inspección sensitiva, además José Mendoza (s.f.) explica lo siguiente en cuanto a la inspección sensitiva:

1. **Ver:** identifica indicios visuales como fugas, corrosión, deformaciones, manchas o acumulación de polvo.
2. **Oír:** detecta ruidos anormales, vibraciones, golpes o chillidos que no se registran en sensores instrumentales.
3. **Sentir:** palpa variaciones de temperatura o vibraciones suaves que pueden indicar desgaste interno (p. ej. rodamientos calientes, alineaciones erradas).
4. **Oler:** percibe olores a quemado, solventes, fugas de aceite, gases o quemaduras eléctricas, comunes en equipos con fuga o recalentamiento.



Figura 1. Metodología VOSO

Fuente: (Cruz, 2025)

Estos pasos conforman una inspección no invasiva que puede realizarse periódicamente en las instalaciones. Su ejecución sistemática —idealmente con checklist estandarizada— permite documentar problemas incipientes y generar alertas tempranas que optimicen el plan de mantenimiento (Rosales, 2023).

7.2.4.2. *Beneficios y aplicaciones en plantas nuevas*

- **Anticipación de fallas y aumento de confiabilidad:** La técnica VOSO permite detectar condiciones de deterioro antes de que se transformen en paradas inesperadas, lo cual mejora la disponibilidad de los activos (Mendoza, s.f.).

- **Economía y simplicidad:** Requiere baja inversión, formación básica y puede emplearse junto a sistemas CMMS. Esto la convierte en una de las técnicas de mantenimiento predictivo más accesibles.
- **Cultura de mantenimiento proactivo:** Fomenta que el personal adquiera una sensibilidad aumentada al comportamiento de los equipos, consolidando una cultura de observación constante y disciplina operativa (Rosales, 2023).
- **Aplicación inicial en plantas nuevas:** En estructuras en fase de arranque, donde no hay un historial de fallas, VOSO crea una línea base de referencia del estado de los equipos, ayudando a validar las condiciones de operación y ajustes en parámetros de mantenimiento (Dynamox, 2023).

7.2.5. Criterios de Planificación del Mantenimiento

La planificación del mantenimiento es fundamental para garantizar la operatividad, eficiencia y sostenibilidad de los equipos industriales. Los criterios asociados a la planificación incluyen la evaluación de la criticidad de los equipos, el uso de herramientas analíticas como el Reliability Block Diagram (RBD), la asignación de presupuesto y recursos, y el cumplimiento normativo. A continuación, se describen estos criterios en detalle.

7.2.6. Evaluación de la Criticidad de los Equipos

La evaluación de la criticidad es un paso inicial esencial en la planificación del mantenimiento, ya que permite identificar y clasificar los equipos según su importancia en la operación general y el impacto que tendría su falla. Según Marrero, este análisis utiliza datos históricos sobre la frecuencia de fallas y los tiempos de reparación, y se basa en métricas como el

MTBF (Mean Time Between Failures) y el MTTR (Mean Time to Repair) para determinar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos (2023, pág. 14).

7.2.7. Importancia del MTBF y MTTR en la Evaluación de Criticidad

El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) son indicadores clave en la gestión del mantenimiento y la evaluación de la criticidad de los equipos. Según Atlassian (s.f.), el MTBF representa el tiempo promedio que un sistema opera sin fallos, siendo una medida de su confiabilidad. Un MTBF alto indica que el equipo tiene una baja probabilidad de fallas recurrentes, mientras que un MTBF bajo sugiere que el sistema es propenso a interrupciones frecuentes.

Por otro lado, el MTTR mide el tiempo promedio necesario para restaurar un equipo tras una falla. Un MTTR reducido refleja una alta eficiencia en las actividades de mantenimiento y una rápida recuperación del sistema, mientras que un MTTR elevado indica tiempos de inactividad prolongados y posibles dificultades en el proceso de reparación (Atlassian, s.f.).

La relación entre estas dos métricas permite determinar la criticidad de los equipos. Aquellos con un MTBF bajo y un MTTR alto son considerados altamente críticos, ya que presentan una alta frecuencia de fallas y tiempos de inactividad prolongados, lo que puede afectar significativamente la operatividad del sistema (Atlassian, s.f.).

7.2.8. Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad es el proceso que, tras la evaluación inicial, permite clasificar los equipos según su nivel de importancia y planificar las estrategias de mantenimiento. Este análisis se realiza a través de varios métodos:

7.2.8.1. *Proceso de Realización del Análisis de Criticidad*

1. **Recopilación de Datos Operativos:** Se obtienen datos históricos de desempeño, como la frecuencia de fallas (MTBF) y tiempos de reparación (MTTR).
2. **Evaluación de Impacto:** Se mide el impacto potencial de la falla en la producción, la seguridad y los costos, así como, Medina Valdivia destaca la importancia de considerar las consecuencias financieras y legales (2021, pág. 67).
3. **Asignación de Niveles de Criticidad:** Se categorizan los equipos en niveles de criticidad (alta, media, baja) utilizando matrices de criticidad y métodos cualitativos y cuantitativos.

7.2.8.2. *Métodos para Asignar Niveles de Criticidad*

1. **Matriz de Criticidad (Matriz de Riesgo):** Combina la probabilidad de falla y la severidad del impacto para clasificar los equipos. Aguirre Tinitana menciona que este método es útil para visualizar y priorizar los equipos más críticos (2019, pág. 48).
2. **Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA):** Evalúa los posibles modos de falla y sus efectos, calculando un Número de Prioridad de Riesgo (RPN). Un RPN alto indica una alta criticidad y necesidad de intervención (Chang PARRALES, 2019, pág. 29).
3. **Análisis de Causa Raíz (RCA):** Identifica las causas subyacentes de las fallas en equipos críticos y asigna niveles de criticidad basados en el riesgo de fallos futuros.
4. **Evaluación basada en MTBF y MTTR:** Equipos con MTBF bajo y MTTR alto se consideran críticos y deben priorizarse en el plan de mantenimiento.

7.2.9. Uso del RBD (Reliability Block Diagram)

El Reliability Block Diagram (RBD) es una herramienta gráfica que permite modelar la confiabilidad de un sistema, representando cómo la falla de uno o más componentes afecta al funcionamiento global. Esta herramienta es fundamental para analizar rutas críticas, evaluar redundancias y priorizar el mantenimiento en los equipos que son esenciales para garantizar la operatividad del sistema.

Ceballos y Parra destacan que el RBD es particularmente útil en la planificación de mantenimiento al permitir identificar componentes clave dentro de sistemas complejos. La integración del RBD con otras herramientas, como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) y la Simulación de Monte Carlo, mejora la capacidad de anticiparse a fallas y optimizar la disponibilidad del sistema (2021, pág. 45). Además, su uso facilita la toma de decisiones al proporcionar una visualización clara de la relación entre los componentes del sistema y su impacto en la confiabilidad general.

7.2.10. Presupuesto y Recursos

La correcta asignación de presupuesto y recursos es fundamental para implementar el plan de mantenimiento. Un plan eficaz debe tener una planificación financiera que garantice la disponibilidad de recursos humanos y materiales necesarios para ejecutar las tareas. Medina Valdivia subraya que una gestión adecuada de los recursos reduce los costos asociados a paradas imprevistas y optimiza la eficiencia operativa (2021, pág. 67).

7.2.11. Cumplimiento Normativo

El cumplimiento de normativas es un criterio indispensable en la planificación del mantenimiento, ya que asegura que las prácticas estén alineadas con los estándares de seguridad y

medio ambiente. Chang Parrales destaca la importancia de las auditorías y evaluaciones periódicas para verificar el cumplimiento de las normativas y garantizar la seguridad en la operación (2019, pág. 29).

Continuaremos con la definición de la metodología 5s dentro de entornos industriales

7.3. Metodología 5S en entornos industriales

La metodología 5S es una herramienta de gestión visual y organizacional originada en Japón, diseñada para mejorar las condiciones del entorno de trabajo mediante la eliminación del desperdicio, el orden sistemático y la disciplina operativa. Su nombre proviene de las iniciales de cinco palabras japonesas que representan los principios fundamentales de la metodología: *Seiri* (Clasificar), *Seiton* (Ordenar), *Seiso* (Limpiar), *Seiketsu* (Estandarizar) y *Shitsuke* (Disciplinar).

En entornos industriales como plantas de tratamiento de relaves, la aplicación de 5S no solo mejora la eficiencia operativa, sino que además tiene un impacto directo en la seguridad del personal, la integridad de los activos y la prevención de accidentes (Vier, 2023). La primera etapa, *Seiri*, busca separar lo necesario de lo innecesario, reduciendo el desorden visual y liberando espacio útil. *Seiton* promueve el orden lógico y accesibilidad rápida a herramientas o materiales críticos. *Seiso*, por su parte, enfatiza la limpieza rutinaria de estaciones de trabajo y equipos, lo cual permite detectar anomalías visibles como fugas, grietas o desgaste incipiente.

Las siguientes fases *Seiketsu* y *Shitsuke* apuntan a mantener la estandarización y crear una cultura organizacional disciplinada, donde el estado ideal del lugar de trabajo se sostenga en el tiempo. En el caso de una planta nueva, la aplicación temprana de 5S establece una línea base de orden y seguridad, facilitando la inspección, el mantenimiento y la identificación de condiciones subestándar que pudieran afectar la confiabilidad operativa.

Según Paula Vier (2023), un entorno que cumple con las 5S permite trabajar más eficientemente, reducir tiempos improductivos, prevenir accidentes, mejorar la moral del equipo y generar confianza tanto interna como externamente. Por ello, su implementación suele ir de la mano con otras estrategias de mantenimiento como el TPM (Mantenimiento Productivo Total), la inspección sensitiva (VOSO) y los sistemas de gestión de activos físicos.

7.4. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es una estrategia técnica que permite definir las acciones de mantenimiento más apropiadas en función de las funciones críticas del sistema, los modos de falla asociados y sus consecuencias operacionales. De acuerdo con Parra Márquez y Crespo Márquez (2015), el RCM se basa en un análisis detallado que considera qué debe hacer el activo, cómo puede fallar, por qué fallaría, qué ocurre si falla, y qué tareas son viables para anticipar, prevenir o mitigar esa falla.

Esta metodología se estructura en torno a la identificación de funciones, modos de fallo y consecuencias, con el fin de establecer políticas de mantenimiento basadas en riesgo, fiabilidad y contexto operativo. La clave del RCM radica en su capacidad para priorizar intervenciones en función de la criticidad de cada componente, evitando tareas innecesarias y enfocándose en aquellas que realmente preservan la función del sistema. Esto permite reducir costos, optimizar recursos técnicos y mejorar la disponibilidad y seguridad operativa (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015)

7.5. Sistemas computarizados de gestión del mantenimiento (CMMS)

En el contexto de la gestión moderna de activos industriales, los sistemas computarizados de gestión del mantenimiento, conocidos como CMMS (por sus siglas en inglés: *Computerized Maintenance Management Systems*), se han consolidado como herramientas fundamentales para garantizar la planificación, seguimiento y control sistemático de las actividades de mantenimiento. Estas plataformas permiten mejorar la eficiencia operativa, reducir los tiempos de inactividad no planificada, y asegurar la trazabilidad técnica y documental de los activos (Goncalves, 2023; Garibian, s.f.).

7.5.1. Fundamentos y funcionamiento

Un CMMS es una solución informática que centraliza toda la información relacionada con los activos físicos de una planta, incluyendo su historial técnico, registros de intervención, programación de tareas preventivas, gestión de repuestos, y datos de confiabilidad. Además, permite automatizar tareas rutinarias, generar alertas predictivas, emitir órdenes de trabajo y analizar el rendimiento de los equipos a través de indicadores técnicos como el MTBF (*Mean Time Between Failures*) o el MTTR (*Mean Time to Repair*) (ServiceChannel, 2025).

Desde una perspectiva teórica, el CMMS se basa en principios de gestión sistemática del mantenimiento y en la idea de que cada activo puede ser monitoreado, medido y optimizado a lo largo de su ciclo de vida. Su funcionamiento se enmarca en el enfoque de mantenimiento basado en condición (*Condition-Based Maintenance*) y gestión de activos basada en datos (*Data-Driven Asset Management*), lo que permite tomar decisiones técnicas fundamentadas en evidencia (Moblely, 2002).

Las funcionalidades típicas de un CMMS incluyen:

- Registro estructurado de equipos, ubicaciones y características técnicas.
- Programación automática de mantenimiento preventivo o predictivo.
- Emisión y seguimiento de órdenes de trabajo correctivas.
- Control de inventario de repuestos y recursos técnicos.
- Análisis de desempeño de los activos mediante KPI técnicos.
- Almacenamiento digital de documentación técnica, manuales y protocolos.

7.5.2. Relación con metodologías de mantenimiento

El CMMS no solo actúa como una herramienta de registro y planificación, sino que constituye el soporte operativo para la implementación de metodologías avanzadas como RCM (*Reliability Centered Maintenance*), TPM (*Total Productive Maintenance*) o FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*). Según Parra Márquez y Crespo Márquez (2015), el uso integrado de estas metodologías en conjunto con un CMMS permite optimizar los recursos técnicos, priorizar tareas según criticidad y mejorar la disponibilidad de los equipos en plantas de alta exigencia operativa.

Asimismo, el uso de un CMMS facilita el cumplimiento de estándares internacionales de gestión de activos como la norma ISO 55000, al permitir la trazabilidad documental, la gestión basada en riesgos y la mejora continua del desempeño técnico (MEX, 2024).

7.5.3. Aplicación y beneficios generales

La literatura técnica y los estudios de casos han evidenciado que la implementación adecuada de un CMMS puede generar beneficios concretos, tales como:



- Reducción de los costos de mantenimiento entre un 10 % y 30 % anual.
- Mejora en la disponibilidad operativa de los equipos críticos.
- Disminución del tiempo de respuesta ante fallas inesperadas.
- Mayor control sobre repuestos y recursos humanos.
- Mejora en la capacidad de auditoría, planificación y cumplimiento normativo.

8. Metodología

La metodología propuesta en esta memoria para el desarrollo del plan de mantenimiento en la planta de tratamiento y depósito de relaves filtrados de la empresa Polpaico Soluciones S.A. está basada en el modelo de gestión de mantenimiento presentado por Parra y Crespo en su libro *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada a la Gestión de Activos* (2015). Este modelo plantea una visión estructurada y secuencial que parte del conocimiento del estado actual, la identificación de activos críticos, el análisis de causas de falla y la definición de estrategias de mantenimiento alineadas con las necesidades operativas y de confiabilidad de la planta.



Figura 2. Modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM).
Fuente: (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015)

Cabe destacar que el modelo de Parra y Crespo (2015) contempla un total de ocho fases. Sin embargo, esta memoria se enfoca en las cinco primeras etapas, ya que las tres fases restantes corresponden a acciones asociadas directamente con la implementación y puesta en marcha del plan de mantenimiento, etapa que aún no es abordable debido a que la planta no se encuentra operativa. En este sentido, la presente investigación se concentra en el diseño y planificación del sistema, dejando establecida la base técnica y metodológica necesaria para su posterior aplicación práctica una vez que la planta entre en funcionamiento.

8.1. Definición de Objetivos y responsabilidades.

Este capítulo tiene como propósito introducir la primera etapa de la metodología propuesta por Parra y Crespo (2015) para la implementación de un plan de mantenimiento. En esta fase se plantea la necesidad de establecer claramente los objetivos del mantenimiento y de definir las responsabilidades de quienes participan en su gestión y ejecución.

Según los autores, esta etapa inicial es clave para orientar adecuadamente el proceso, ya que permite alinear el mantenimiento con las metas operativas de la empresa y asegurar la participación de todos los actores involucrados. Para ello, se recomienda la conformación de un equipo de trabajo interdisciplinario que incluya personal de mantenimiento, operadores, supervisores e ingenieros, con el fin de integrar experiencia técnica, conocimiento operativo y visión estratégica.

En el caso específico de esta memoria, esta sección busca dejar establecida la importancia de este planteamiento para su futura aplicación en la planta de tratamiento de aguas de Polpaico Soluciones S.A. Si bien aún no se cuenta con un equipo conformado, se considera que, al momento

de implementar el plan, será necesario constituir este grupo de trabajo para garantizar un análisis técnico efectivo y una planificación acorde a la realidad de la operación.

8.2. Jerarquización de los equipos de acuerdo con la importancia de función

Para realizar una correcta jerarquización de los equipos se utilizará un modelo de criticidad semicuantitativo CTR (Criticidad total por riesgo), el cual utiliza una metodología que permite ordenar los equipos e instalaciones según el riesgo que representan para el proceso productivo. Tal como lo describe Parra y Crespo (2015), el modelo CTR considera una combinación de la frecuencia de fallos y las consecuencias asociadas a cada equipo, utilizando la siguiente fórmula:

$$CTR = FF \times ((IO \times FO) + CM + SHA)$$

Donde:

- **FF:** Frecuencia de fallos
- **IO:** Impacto en la producción
- **FO:** Flexibilidad operativa
- **CM:** Costos de mantenimiento
- **SHA:** Impacto en seguridad, higiene y medio ambiente

Este análisis tiene un carácter semicuantitativo, ya que muchas de las variables deben ser evaluadas por expertos o mediante consenso con personal técnico. En el caso del proyecto sería personal Polpaico, este análisis se basa en información de catálogos técnicos, experiencia del personal y conocimiento del proceso.

8.3. Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.

Una vez jerarquizados los equipos, se continúa con el análisis de puntos débiles de los equipos de alto impacto, es por lo cual, aquellos que fueron clasificados como críticos se someten

a un Análisis de Causa Raíz (ACR), que tiene como finalidad identificar las causas fundamentales que originan los fallos más recurrentes o de mayor impacto. Este análisis, según Parra y Crespo (2015), se estructura en cinco etapas:

1. Definición y jerarquización de problemas.
2. Identificación y priorización de modos de falla.
3. Formulación y validación de hipótesis.
4. Determinación de causas físicas, humanas y latentes.
5. Evaluación de la eficacia de las soluciones propuestas

Ya que la planta es nueva y aun no se encuentra en funcionamiento, el ACR se realiza de manera teórica, utilizando información recopilada de manuales de fabricante, experiencias de operaciones similares, y referencias bibliográficas, dado que no se cuenta con un historial operativo documentado de fallas, además de abordar las fallas comunes que presentan los equipos críticos.

8.4. Diseño de planes de mantenimiento preventivo y de los recursos necesarios.

Posteriormente, se realiza un Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF o FMEA), para cada uno de los equipos identificados como críticos. Este análisis permite establecer los modos de falla potenciales, las causas y consecuencias de dichas fallas, su frecuencia y posibilidad de detección.

Sus pasos asociados son: seleccionar el sistema o equipo en este caso los equipos críticos, analizar el contexto definir funciones, fallos funcionales y modos de fallo, así como sus efectos y consecuencias.

8.5. Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos

Esta etapa se enfoca en la programación efectiva de las tareas de mantenimiento, considerando los recursos disponibles y los resultados obtenidos en las etapas anteriores del análisis. El objetivo principal es optimizar la asignación de personal, herramientas, materiales y tiempos, de manera que se garantice la ejecución oportuna de las actividades preventivas y predictivas para todos los equipos evaluados.

A partir de los planes de mantenimiento definidos para los equipos críticos, medianamente críticos y no críticos, se estructura un calendario de mantenimiento que permita integrar las tareas técnicas a la rutina operativa de la planta sin afectar la continuidad del proceso. Esta programación considera tanto la frecuencia recomendada como la criticidad del equipo, dando prioridad a aquellas actividades cuyo retraso podría generar consecuencias operacionales o ambientales significativas.

Además, en esta fase se busca distribuir racionalmente los recursos, evitando la sobrecarga de personal o la duplicidad de tareas. Para ello, se utilizan criterios como la agrupación de actividades por área o tipo de equipo, el uso compartido de herramientas y la alineación con los turnos de operación.

Esta planificación detallada será fundamental para asegurar que el plan de mantenimiento propuesto sea viable y sustentable en el tiempo, permitiendo a la planta operar con altos niveles de confiabilidad y eficiencia.

9. Enfoque de la Investigación

El enfoque metodológico adoptado en este trabajo es de tipo semicuantitativo, también conocido como mixto, ya que a lo largo de las distintas fases se combinan herramientas cualitativas, cuantitativas y semicuantitativas. Este enfoque permite desarrollar un análisis más robusto y estructurado, especialmente en contextos donde la información empírica es limitada.

Dado que la planta de tratamiento y depósito de relaves filtrados de Polpaico Soluciones S.A. es nueva, carece de un historial documentado de fallas y datos operacionales precisos debido a que es una nueva instalación dentro de la empresa, no es posible aplicar de manera rigurosa una metodología de carácter estrictamente cuantitativo. Sin embargo, el uso de herramientas semicuantitativas como el análisis de criticidad (CTR) y el análisis modal de efectos y fallos (AMEF) permite incorporar juicios técnicos expertos, tablas de ponderación y factores de evaluación que superan el enfoque netamente cualitativo.

De este modo, el enfoque semicuantitativo utilizado ofrece una alternativa viable y práctica para la evaluación de la confiabilidad de los activos, facilitando la toma de decisiones informadas en la planificación del mantenimiento, incluso en escenarios con datos limitados.

10. Presentación y Análisis de Resultados

El presente capítulo expone y analiza los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 8, cuyo objetivo fue el desarrollo de un plan de mantenimiento integral para el sistema de tratamiento de aguas filtradas y depósito de relaves de la planta de Polpaico Soluciones S.A. Dado que la planta aún no ha iniciado operaciones, los resultados aquí presentados se basan en el diseño teórico del plan, fundamentado en normativas, literatura técnica, experiencia de ingeniería aplicada y documentación oficial del proyecto.

10.1. Resultados asociados a la definición de objetivos y responsabilidades para el sistema de mantenimiento

A partir del desarrollo de la primera fase metodológica de esta memoria, correspondiente a la definición de los objetivos generales del sistema de mantenimiento y la asignación de responsabilidades para su implementación, se establecieron elementos clave que permiten alinear la gestión del mantenimiento con las necesidades operativas de la planta de tratamiento de aguas y relaves, así como con los objetivos estratégicos de Polpaico Soluciones S.A.

De acuerdo con la propuesta metodológica de Parra y Crespo (2015), esta etapa inicial es fundamental, ya que establece las bases organizativas y estratégicas sobre las cuales se construye el sistema de mantenimiento. En este sentido, es indispensable definir con precisión qué se espera lograr mediante las actividades de mantenimiento —por ejemplo, disponibilidad operativa, confiabilidad, seguridad, eficiencia y sostenibilidad—, y asignar de manera clara las funciones y responsabilidades de cada uno de los actores involucrados. Esta estructura no solo permite una mejor planificación y control de las tareas, sino que además promueve la participación activa de perfiles técnicos diversos, cuyo conocimiento complementario resulta esencial para un análisis completo y una toma de decisiones informada.

En el contexto particular de esta investigación, se constató que la planta aún no se encuentra en operación, razón por la cual no existe a la fecha una estructura formal de mantenimiento constituida. No obstante, este escenario ofrece la oportunidad de anticipar consideraciones importantes que deberán ser abordadas por la empresa durante la etapa de puesta en marcha, a fin de establecer un sistema de mantenimiento robusto desde sus inicios. Entre los principales resultados y recomendaciones derivadas de esta fase, se destacan los siguientes:

- Se propone como uno de los objetivos principales del sistema de mantenimiento asegurar la disponibilidad continua de los sistemas de filtrado y transporte de relaves. Esta condición es crítica para evitar interrupciones que puedan comprometer la continuidad del proceso cementero. En concordancia con los documentos técnicos del proyecto elaborados por Ágora Soluciones, se establece que la planta debe mantener una disponibilidad mínima de 327,5 días al año, excluyendo paradas mayores no programadas.
- Se identifica la necesidad de conformar un equipo de mantenimiento multidisciplinario, compuesto por personal técnico, operadores, supervisores y representantes de las áreas de seguridad y medioambiente. Esta integración permitirá abordar los desafíos técnicos y operativos de manera coordinada, fortaleciendo el análisis de activos y la gestión de recursos desde el inicio de la operación.
- Se recomienda establecer canales formales de comunicación entre las áreas de operación, mantenimiento y supervisión, con el propósito de facilitar el flujo de información técnica, la detección temprana de desviaciones, la programación de tareas y la retroalimentación constante del plan.

- Asimismo, se sugiere definir una matriz de funciones y responsabilidades que delimite claramente los roles de cada integrante del equipo, promoviendo una asignación eficiente de tareas y asegurando la trazabilidad de las actividades realizadas.

Si bien este análisis se ha desarrollado desde una perspectiva teórica debido a la etapa actual del proyecto, los resultados aquí expuestos constituyen una base sólida sobre la cual la empresa podrá estructurar su sistema de mantenimiento en el futuro. Su implementación contribuirá a la construcción de una cultura de confiabilidad de la empresa, lo cual será clave para alcanzar los niveles de desempeño esperados en términos de disponibilidad, seguridad y eficiencia operacional.

10.2. Resultados del análisis cualitativo de criticidad (CTR)

El análisis cualitativo de criticidad (CTR) aplicado en esta memoria corresponde a la segunda fase metodológica del estudio. Su finalidad es establecer una jerarquización técnica de los equipos presentes en la planta de tratamiento de aguas y relaves, en función de su impacto sobre la operación, el medioambiente, los costos de mantenimiento y la frecuencia esperada de fallas.

Este procedimiento se llevó a cabo siguiendo el modelo propuesto por Parra y Crespo (2015), utilizando la fórmula previamente descrita en la sección 8.2 de esta memoria. El resultado de este análisis permite clasificar los equipos en tres niveles de criticidad: alta, media y baja, lo cual facilita una asignación racional de recursos y esfuerzos en la planificación de mantenimiento.

10.2.1. Levantamiento de información y validación de factores de criticidad

El desarrollo del análisis cualitativo de criticidad (CTR) implicó la recopilación estructurada de información técnica clave, dado que la planta de tratamiento de aguas filtradas y

depósito de relaves de Polpaico Soluciones S.A. aún se encuentra en etapa de construcción, y no cuenta con registros operacionales históricos.

Frente a este escenario, se adoptó un enfoque semicuantitativo, en línea con lo propuesto por Parra y Crespo (2015), y se realizó un levantamiento de datos basado en fuentes internas, entrevistas técnicas y documentación entregada por el equipo de ingeniería de la empresa.

Uno de los principales aportes fue proporcionado por el jefe del proyecto, Fernando Neira (2024), quien facilitó documentos técnicos elaborados por Ágora Soluciones, empresa encargada del diseño de la planta. Esta información incluyó modelos de balance de caudales, secuencias de procesos y análisis de criticidad funcional, los cuales fueron fundamentales para determinar dos factores clave del modelo CTR:

- El factor IO (Impacto en la Producción) se definió a partir de estos documentos, considerando los puntos cuya detención generaría una interrupción significativa del sistema, ya sea en la operación del tratamiento de relaves o en la recuperación de agua.
- El factor FO (Flexibilidad Operativa) se estableció mediante el análisis del diagrama de flujo del sistema (Figura 7, Anexo A), evaluando la existencia de equipos de respaldo o alternativas operativas, así como los tiempos logísticos asociados a reparaciones, según lineamientos técnicos definidos por el equipo del proyecto.

En cuanto a la Frecuencia de Fallas (FF), esta fue estimada a partir de entrevistas técnicas con el jefe de mantenimiento preventivo y predictivo Fernando Rivas (2024), quien aportó información basada en equipos equivalentes ya operativos en otras plantas de Polpaico Soluciones. Debido a la falta de datos propios en esta instalación, se utilizó evidencia de equipos en

condiciones operativas similares, lo que permitió proyectar razonablemente la frecuencia de fallas esperada para cada equipo.

Los factores CM (Costos de Mantenimiento) y SHA (Seguridad, Higiene y Medio Ambiente) fueron validados por el mismo equipo técnico, considerando criterios normativos, ambientales y operacionales establecidos para la planta.

Todo este proceso de levantamiento y validación de información técnica no sólo aseguró la consistencia del modelo CTR aplicado, sino que además sirvió como base de entrada para el posterior desarrollo del Análisis de Causa Raíz (ACR) de los equipos críticos, al entregar información estructurada sobre funciones, modos de falla y condiciones operacionales. Este enfoque fortalece la trazabilidad metodológica y la validez técnica del estudio, aun cuando se trate de una planta en etapa de pre-operación.

10.2.2. Clasificación general de equipos

Como resultado del análisis CTR, se generó la Tabla 44, que se encuentra en el Anexo A la cual posee todos los equipos incluidos en el sistema. Además, esta tabla agrupa los criterios asociados a la metodología y entrega el resultado de los equipos según su nivel de criticidad además cabe destacar que los factores ponderados y la matriz de criticidad que se utiliza se encuentran también en el Anexo A.

Como síntesis de los resultados obtenidos en la Tabla 44, se construyó la Figura 3, un gráfico de dispersión que representa la criticidad de los equipos en función de su frecuencia de falla (FF) (eje X) y su consecuencia total ($CTR = FF \times (IO \times FO + CM + SHA)$) (eje Y).

En el gráfico se incorporan dos curvas de corte (Curva 1 y Curva 2), que delimitan los rangos de criticidad alta, media y baja, según lo establecido en la Matriz de Criticidad de Parra y

Crespo (2015) presentada en la Tabla 43. Estas curvas permiten clasificar gráficamente a los equipos en función del modelo CTR:

- Los puntos por encima o sobre de la Curva 1 representan equipos de criticidad alta,
- Los puntos entre Curva 1 y Curva 2, o sobre la Curva 2 representan equipos de criticidad media
- Los puntos bajo la Curva 2, representan equipos de criticidad baja.

Esta representación facilita la priorización visual de activos, reforzando la jerarquización propuesta y guiando la asignación de recursos para el diseño del plan de mantenimiento.

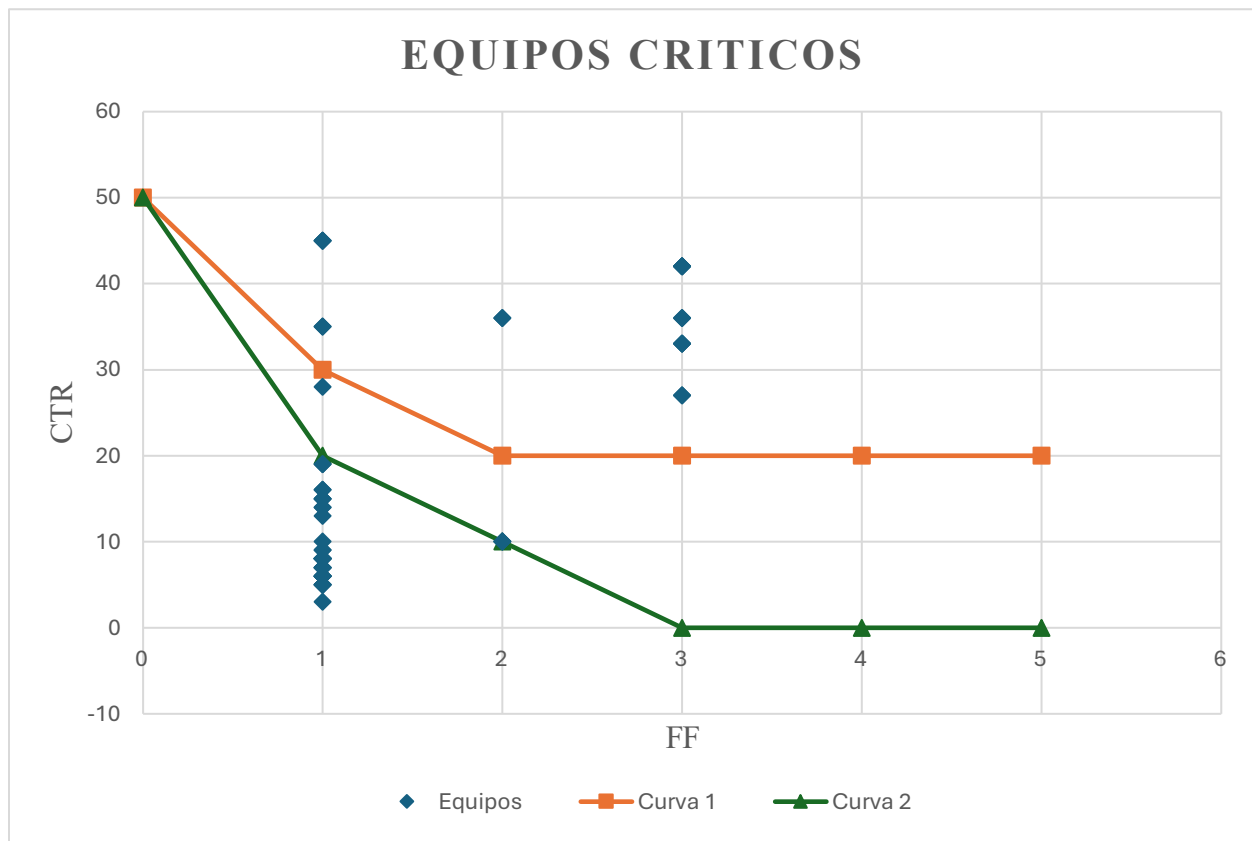


Figura 3. Gráfico de dispersión de equipos críticos
Fuente: Creación Propia

Obteniendo como resultado un total de 14 equipos de criticidad alta, 8 de criticidad media y 35 de criticidad baja.

Esta clasificación sirvió como base para definir los niveles de intervención necesarios, priorizando los equipos críticos para análisis más detallados, mientras que para los de criticidad media o baja se tomaran medidas más estándar o que se acoplen directamente con actividades preventivas que pasen por el área al momento de revisar equipos críticos.

10.2.3. Identificación de equipos críticos

Los equipos clasificados como críticos presentan un alto impacto potencial en la operación continua del sistema, en la seguridad del personal o en el cumplimiento de normas ambientales. Estos activos deben ser objeto de estrategias de mantenimiento específicas y, por lo tanto, serán evaluados en profundidad a través de un análisis de causa raíz (ACR) en el siguiente apartado de esta memoria.

Los equipos que se encuentran como críticos como resultado de este análisis se pueden agrupar de la siguiente manera:

1. Bombas centrífugas:

- Bombas retorno agua a planta: 5117-PP-03, 5117-PP-04
- Bombas alimentación a filtro: 5117-PP-07, 5117-PP-08, 5117-PP-09
- Bombas agua preparación floculante: 5117-PP-15, 5117-PP-16
- Bombas agua núcleo filtros: 5117-PP-22, 5117-PP-23

2. Filtros prensa y unidad hidráulica:

- Filtros prensa: 5117-FL-01, 5117-FL-02
- Unidades hidráulicas completas: 5117-HU-01, 5117-HU-02

3. Espesador High Rate:

- Espesador de relaves: 5117-EP-01

Cabe destacar que el Tag utilizado por los equipos en este documento fueron proporcionados por la empresa Agora soluciones y que estos pueden cambiar al momento de ingresarse al sistema de Polpaico Soluciones

10.3. Análisis de causa raíz (ACR) aplicado a los equipos críticos

En esta sección se presenta el análisis de causa raíz (ACR) desarrollado para los equipos clasificados como críticos, de acuerdo con los resultados del análisis de criticidad (CTR) expuestos en la sección 10.2.2. Este análisis fue realizado siguiendo las cinco etapas propuestas por Parra y Crespo (2015): (1) definición y jerarquización de problemas, (2) identificación y priorización de modos de falla, (3) formulación y validación de hipótesis, (4) determinación de causas físicas, humanas y latentes, y (5) evaluación de la eficacia de las soluciones propuestas. Estas fases estructuran el análisis para cada equipo prioritario y permiten una identificación profunda de las causas fundamentales de fallas, a partir de la cual se plantean acciones correctivas y preventivas. Dado que la planta de tratamiento de aguas filtradas y relaves de Polpaico Soluciones S.A. aún no se encuentra en funcionamiento, el análisis se realizó de forma teórica, utilizando bibliografía técnica especializada, experiencias de proyectos similares y documentación técnica actualizada.

El análisis se organiza por tipo de equipo crítico, agrupando modos de falla y causas potenciales de acuerdo con sus características de diseño, condiciones de operación y funciones dentro del proceso. Esta estructura facilita la identificación de acciones de mantenimiento específicas para cada categoría y permite priorizar intervenciones en función de su impacto potencial.

10.3.1. Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas utilizadas en el sistema de tratamiento de aguas y relaves están expuestas a condiciones severas de operación. Estas condiciones elevan la probabilidad de fallas mecánicas, hidráulicas, eléctricas y operacionales. A continuación, se analizan estas fallas agrupadas según su naturaleza, para el grupo de bombas centrífugas el cual incluye bombas de retorno de agua a planta, bombas de alimentación a filtros prensa, bombas de preparación de floculante y bombas de proceso filtrado. La información ha sido extraída de fuentes técnicas especializadas como Geohidráulica (s.f.), Dynapro Pumps (2023), Rowland (2023), PSG Dover (2022), Interflon (2024), Cadel (2023), Kehuan Pumps (2022), Simonson (2023), Industrias Dolz (2023), Vedan (2025) y brindada por el área de mantenimiento de Polpaico Soluciones.

10.3.1.1. Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas representan una de las principales causas de interrupción en el funcionamiento de las bombas centrífugas. Estas fallas afectan directamente a componentes como rodamientos, impulsores, ejes, poleas y sellos. Suelen originarse por desgaste, desalineaciones, vibraciones o deficiencias estructurales.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Desgaste por abrasión	Lodos con alto contenido de sólidos, velocidades elevadas	Pérdida de eficiencia, erosión en componentes internos

Fuga en sello mecánico o empaquetadura	Sellos desgastados o mal ajustados, grietas en camisa de eje	Pérdida de fluido, contaminación, aireación
Falla de rodamientos	Lubricación incorrecta, contaminación, sobrecarga, desalineación	Ruido metálico, sobrecalentamiento, bloqueo del eje
Desalineación / vibración	Ejes mal alineados, bases sueltas, acoplamientos defectuosos	Vibración, desgaste acelerado, fallos estructurales
Impulsor dañado o desbalanceado	Impacto con sólidos, fatiga de material, aglomeraciones	Ruidos, vibración, pérdida repentina de caudal y presión
Rotura de eje o acoplamiento	Sobrecarga, fatiga por vibración, material defectuoso	Parada inmediata, daño a componentes adyacentes
Desgaste de poleas	Fricción prolongada con correas, materiales abrasivos, falta de mantenimiento	Deslizamiento de correas, pérdida de eficiencia, generación de calor
Desalineación de poleas	Montaje incorrecto, deformación estructural, vibración acumulada	Desgaste lateral de correas, vibraciones, fallas en rodamientos
Tensión incorrecta de correas	Ajuste deficiente, pérdida de tensión por uso o elongación	Patinaje, fatiga del material, sobrecarga de rodamientos

Tabla 1. Modos de fallas mecánicas de Bombas Centrífugas
Fuente: Creación Propia.

10.3.1.2. Fallas hidráulicas

Las fallas hidráulicas se asocian a deficiencias en el comportamiento del fluido dentro del sistema de bombeo, tales como cavitación, obstrucciones, pérdida de cebado y vórtices en succión. Estas condiciones pueden provocar erosión interna, pérdida de eficiencia o incluso daños catastróficos en los impulsores y sellos.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Cavitación	Presión de succión baja, aireación, líquido caliente	Vibraciones, burbujeo, daño erosivo en impulsor y carcasa
Obstrucción	Sólidos gruesos en tuberías o impulsor, sedimentos acumulados	Pérdida de cebado, aumento de presión, vibración

Flujo insuficiente / caudal bajo	Impulsor tapado, holgura excesiva, válvulas mal ajustadas	Caudal bajo, presión insuficiente, sobrecalentamiento
Pérdida de cebado	Nivel de líquido bajo, válvulas cerradas, fugas de aire	Arranque fallido, ruido de succión, daño por falta de refrigeración
Vórtice en succión	Nivel muy bajo o caudal elevado en succión	Pulsaciones, pérdida intermitente de carga

Tabla 2. Modos de fallas Hidráulicos de Bombas Centrífugas
Fuente: Creación Propia.

10.3.1.3. Fallas eléctricas

Las fallas eléctricas afectan al sistema de alimentación, protección y control de las bombas. Se incluyen en esta categoría problemas como sobrecargas, conexiones defectuosas y fallos en arrancadores o variadores. Estas situaciones comprometen la continuidad operativa y pueden dañar irreversiblemente el motor.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Sobrecarga del motor	Cortocircuito, pérdida de fase, bloqueo hidráulico	Detención inmediata, protección térmica activada
Fallo en arrancador/variador	Componentes defectuosos, ajustes incorrectos	Fallo de arranque, detención abrupta
Conexiones/alimentación deficiente	Cableado suelto, voltaje bajo, fases desequilibradas	Caudal inestable, sobrecalentamiento

Tabla 3. Modos de fallas eléctricas de Bombas Centrífugas
Fuente: Creación Propia.

10.3.1.4. Fallas operacionales

Las fallas operacionales derivan de errores en el uso o en la configuración del sistema, como operar fuera del punto óptimo, rotación inversa o ciclos inadecuados de encendido/apagado. Estas condiciones pueden no ser evidentes a simple vista, pero generan un desgaste acelerado y una pérdida significativa de rendimiento.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Funcionamiento en seco	Falta de cebado, válvulas cerradas, pérdida de nivel	Sobrecalentamiento, daño en sellos e impulsor

Arranques/paros frecuentes	Ciclo de trabajo inadecuado, presiones inestables	Desgaste prematuro, consumo energético elevado
Rotación inversa	Cableado invertido, giro incorrecto	Sin caudal, vibraciones, daño en componentes
Operación fuera del punto óptimo	Válvula cerrada o exceso de sólidos	Recirculación, sobrecarga, reducción de vida útil

Tabla 4. Modos de fallas Operacional de Bombas Centrífugas
Fuente: Creación Propia.

10.3.1.5. Fallas en sistemas de lubricación

Las fallas en los sistemas de lubricación son críticas para la operación de las bombas centrífugas, ya que afectan directamente a los componentes rotativos y sellos. Estas fallas son comunes en ambientes de relaves debido a la alta presencia de partículas y humedad.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Lubricación insuficiente o inadecuada	Falta de lubricante, selección incorrecta, mezcla de grasas incompatibles, mantenimiento deficiente	Sobrecalentamiento, ruidos anómalos, vibraciones, falla prematura de rodamientos
Contaminación del lubricante	Ingreso de polvo, agua o partículas de relave; herramientas sucias en la re-lubricación	Abrasión interna, oxidación, pérdida de viscosidad, fallos en rodamientos
Exceso de lubricante	Sobre lubricación, errores en sistemas automáticos, engrasado con equipo en operación	Aumento de temperatura, fuga por sellos, sobrepresión en rodamientos
Fallo en dispositivos de lubricación	Bloqueo de líneas, avería de bombas de aceite o engrase automático	Falta de lubricación súbita, daño grave a cojinetes y ejes

Tabla 5. Modos de fallas de lubricación de Bombas Centrífugas
Fuente: Creación Propia.

10.3.2. Filtros prensa y unidad hidráulica

Los filtros prensa y las unidades hidráulicas son componentes críticos del sistema de manejo de relaves en la industria cementera, especialmente considerando el objetivo operativo de la empresa de realizar el depósito en seco de estos desechos. Ambos equipos trabajan de forma

integrada, ya que el funcionamiento del filtro prensa depende directamente del correcto desempeño de la unidad hidráulica, la cual es responsable de generar y mantener la presión necesaria para el cierre de placas, la compactación de los sólidos y el desarrollo del ciclo de filtrado. Estas condiciones de operación exigente favorecen la aparición de fallas que, si no se identifican y controlan oportunamente, pueden comprometer la eficiencia del proceso. Por ello, a continuación, se describen las fallas más comunes agrupadas según su naturaleza técnica. En la sección 10.3.2.1 se abordan las fallas del filtro prensa clasificadas como mecánicas, hidráulicas, eléctricas y de control. En la sección 10.3.2.2 se detallan las fallas de la unidad hidráulica, también organizadas bajo dicha tipología. La información presentada ha sido extraída de fuentes técnicas y operativas como Roxia (2025), JXSC Mining (2022), Micronics Inc. (s.f.), Woking (s.f.), Valmet (2018), Autemi (s.f.), Filtronic (2009), además como antecedentes entregados por el equipo de mantenimiento de Polpaico Soluciones.

10.3.2.1. Fallas en Filtros Prensa

A continuación, se muestran las fallas encontradas relacionadas con los filtros prensa agrupadas de acuerdo con su naturaleza.

10.3.2.1.1. Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas en filtros prensa están asociadas al desgaste físico y a la fatiga de materiales que conforman la estructura y los componentes móviles del equipo. Estas pueden surgir por un uso prolongado, falta de mantenimiento o condiciones operativas adversas como altas presiones, temperaturas o acumulación de sólidos, afectando la funcionalidad y la seguridad operativa del sistema.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
----------------------	------------------------	---------------------------------

Desgaste o deformación de placas	Presiones y temperaturas fuera de diseño; aire comprimido en exceso	Fugas entre placas, pérdida de sellado, menor eficiencia de filtrado
Acumulación de sólidos/atascos	Residuos entre placas; limpieza deficiente de telas	Dificultad para cerrar/aperturar, goteos, mayor tiempo de ciclo
Fatiga o fisuras en bastidor	Desalineación, residuos bajo guías, cargas desequilibradas	Desalineación de placas, vibraciones, riesgo estructural
Falla en mecanismos de apertura/movimiento	Desgaste de engranajes, rodamientos, ejes o guías	Movimiento irregular, ruido, parada del equipo

Tabla 6. Modos de fallas mecánicas del Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.3.2.1.2. Fallas hidráulicas

Las fallas hidráulicas afectan directamente al sistema de cierre y operación del filtro prensa, ya que comprometen la presión necesaria para sellar adecuadamente las placas y ejecutar el ciclo de filtración. Estas pueden originarse por fugas internas, problemas de viscosidad o contaminación del aceite, y son críticas para la eficiencia del proceso.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Pérdida de presión de cierre	Fugas en cilindros, sellos gastados, válvulas defectuosas	Filtración deficiente, necesidad de bombeo continuo
Fuerza de cierre insuficiente	Aceite caliente, bomba desgastada, válvula de alivio mal ajustada	No cierra completamente, no inicia el ciclo
Golpes de ariete	Aire atrapado en circuito, bajo nivel de aceite	Ruido hidráulico, presión inestable, vibraciones

Tabla 7. Modos de fallas hidráulicas del Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.3.2.1.3. Fallas eléctricas

Las fallas eléctricas impactan tanto la operación como la automatización del filtro prensa, involucrando motores, sensores, cajas de conexión y la alimentación eléctrica. Estas fallas suelen estar relacionadas con entornos hostiles, humedad, mala instalación o mantenimiento deficiente, y pueden provocar la detención total del sistema.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Falla del motor eléctrico	Sobrecarga, baja ventilación, humedad, polvo o cortocircuito	Detención del ciclo, sobrecalentamiento, disparo de protecciones
Daño en sensores inductivos o de presión	Ingreso de humedad, conexiones defectuosas, envejecimiento	Lecturas erráticas, fallos en la secuencia automática
Cortocircuito en cajas de conexión	Sellado deficiente, instalación deficiente	Falla del PLC, daños a módulos de entrada/salida
Alimentación inestable o fases ausentes	Red eléctrica deficiente, sobrecarga, falta de mantenimiento preventivo	Comportamiento errático, disparo de protecciones

Tabla 8. Modos de fallas eléctricos del Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.3.2.1.4. Fallas de control

Las fallas de control comprometen la lógica de funcionamiento automatizado del filtro prensa, incluyendo el PLC, los sensores de seguridad y los interbloqueos. Estas fallas suelen derivarse de errores en la programación, daños eléctricos o interferencias en señales, generando interrupciones en la secuencia operativa o acciones peligrosas si no son detectadas a tiempo.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Error en la lógica del PLC	Bug en el programa, fallo de sensor, corrupción del software	Ciclo se detiene o salta pasos, tortas húmedas, apertura insegura
Pérdida de señales de sensores críticos	Fallo de sensor de posición/presión, mala conexión, interferencia	PLC no reconoce condiciones seguras, detención del ciclo
Interbloqueos anulados o desactivados	Manipulación indebida, falla en entradas digitales del PLC	Apertura bajo presión, riesgo de daño estructural
Sobrevoltaje o picos eléctricos	Falta de protección, tormentas, fallas de red	Daño al PLC o módulos de control

Tabla 9. Modos de fallas de control del Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.3.2.2. Unidad hidráulica

A continuación, se muestran las fallas encontradas relacionadas con la unidad hidráulica agrupadas de acuerdo con su naturaleza.

10.3.2.2.1. Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas en la unidad hidráulica generalmente se relacionan con el deterioro de componentes como bombas, motores, mangueras o tuberías. Estas fallas pueden causar pérdidas de presión, fugas o interrupciones inesperadas en el sistema, afectando la confiabilidad de la operación.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Falla de bomba hidráulica	Contaminación del aceite, cavitación, desgaste interno	Pérdida de presión, ruido, parada del sistema
Falla en motor eléctrico de bomba	Rodamientos dañados, sobrecarga, ventilación deficiente	Ruido, sobrecalentamiento, interrupción total
Rotura de mangueras o tuberías	Presión excesiva, envejecimiento, montaje incorrecto	Pérdida repentina de presión, derrame de aceite

Tabla 10. Modos de fallas mecánicas de Unidad Hidráulica
Fuente: Creación Propia.

10.3.2.2.2. Fallas eléctricas

Las fallas eléctricas en la unidad hidráulica afectan motores, bobinas y sistemas de alimentación. Suelen ser provocadas por sobrecargas, cortocircuitos, calor excesivo o condiciones ambientales severas, provocando paros del sistema o fallos en la activación de válvulas.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Falla del motor eléctrico	Sobrecarga, cortocircuito, baja tensión	Detención súbita, sobrecalentamiento
Falla en bobinas o solenoides	Calor excesivo, ciclos prolongados, polvo	Válvulas no responden, ciclo detenido

Tabla 11. Modos de fallas eléctricas de Unidad Hidráulica
Fuente: Creación Propia.

10.3.2.2.3. Fallas de control

Las fallas de control en la unidad hidráulica comprometen los dispositivos encargados de regular la presión, el encendido/apagado de la bomba o la secuencia de funcionamiento. Errores

en presostatos, relés o lógica de control pueden provocar ciclos incompletos, sobrepresiones o falta de respuesta del sistema.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Error en presostato	Mal calibrado, sensor dañado	Presión incorrecta, sobrepresión o corte anticipado
Falla en contactores/relés	Bobinas quemadas, vibración, envejecimiento	Bomba no arranca o no se detiene

*Tabla 12. Modos de fallas de control de Unidad Hidráulica
Fuente: Creación Propia.*

10.3.3. Fallas en Espesador High Rate

El espesador tipo High Rate de 20 m de diámetro, empleado en la industria del cemento para el tratamiento de relaves filtrados, es un equipo crítico en el proceso de recuperación de agua y espesamiento de lodos. A pesar de su eficiencia, este sistema puede presentar diversas fallas que comprometen su operación. En esta sección se analizan fallas mecánicas, hidráulicas, operacionales, de control e instrumentación, eléctricas y de lubricación, basadas en información de Dynamox (2024), Smith (2024), Bernal (2021), JXSC Mining (2022), 911Metallurgist (s.f.) y Rhosonics (2022).

10.3.3.1. Fallas Mecánicas

Los componentes mecánicos del espesador, como el sistema de rastras, eje central, reductor y mecanismos de elevación están expuestos a esfuerzos mecánicos constantes y condiciones abrasivas. Estas fallas pueden resultar en la detención total del equipo y requieren monitoreo y mantenimiento continuo.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Embancamiento del rastrillo	Acumulación excesiva de sólidos, dosificación inadecuada de floculante	Aumento de torque, detención del mecanismo

Rotura del eje o brazos del rastrillo	Material grueso inesperado, sobrecarga prolongada	Parada total, daño estructural
Falla del reductor o motor	Desgaste, corrosión, esfuerzo continuo	Pérdida de capacidad de torque, necesidad de reemplazo
Falla en sistema de elevación de rastras	Desgaste mecánico, falta de lubricación	Imposibilidad de alivio en eventos de alto torque

Tabla 13. Modos de fallas mecánicas del Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.3.3.2. Fallas Hidráulicas

Las fallas hidráulicas están asociadas principalmente a obstrucciones, desgaste por abrasión y ruptura de tuberías o bombas, afectando el flujo de relaves y el equilibrio entre entrada y salida del sistema.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Obstrucción en línea de descarga	Acumulación de sólidos, tasa de descarga insuficiente	Bajo caudal, aumento de nivel, posible embancamiento
Desgaste de bomba de descarga	Abrasión por pulpa densa	Caída de rendimiento, acumulación de sólidos
Rotura de tuberías	Presión alta, erosión, corrosión	Derrame de relaves, parada del sistema
Falla en rebose	Obstrucción de canaletas, exceso de alimentación	Derrame no contenido, pérdida de agua clara

Tabla 14. Modos de fallas hidráulicas del Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.3.3.3. Fallas Operacionales

Estas fallas están relacionadas con el proceso de espesamiento mismo: fluctuaciones en la densidad de descarga, turbidez del rebose, y fenómenos como la rotación de la cama de lodos. Una gestión adecuada del proceso y automatización son claves para prevenirlas.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Alta turbidez en rebose	Mala dosificación de floculante, carga excesiva	Pérdida de agua clara, menor recuperación
Densidad insuficiente en descarga	Descarga muy rápida, baja compactación	Aumento de carga en filtros posteriores
Rotación de cama de lodos	Inestabilidad de interfaz, material fino	Rebase repentino, pérdida de control
Sobreconsumo de floculante	Mal control, presencia de arcillas	Costos elevados, flóculos ineficientes

Tabla 15. Modos de fallas operacionales del Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.3.3.4. Fallas de Instrumentación y Control

La instrumentación defectuosa o mal calibrada puede inducir decisiones erróneas de operación, afectando el rendimiento del espesador. Estas fallas también incluyen estrategias de control inadecuadas.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Sensores descalibrados	Condiciones agresivas, falta de mantenimiento	Lecturas erróneas, control deficiente
Tecnología inadecuada de sensores	Mal diseño o instalación	Mediciones no confiables, errores de control
Fouling de sensores	Acumulación de lodo, suciedad	Lecturas falsas o nulas
Estrategia de control mal ajustada	Sintonización deficiente, lógica incorrecta	Oscilaciones, baja eficiencia

Tabla 16. Modos de fallas de instrumentación y control del Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.3.3.5. Fallas Eléctricas

Los sistemas eléctricos que soportan al espesador pueden fallar debido a la humedad, cortocircuitos o envejecimiento de componentes. Esto afecta la operación continua del sistema y puede representar un riesgo operativo importante.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Falla del motor eléctrico	Sobrecarga, baja ventilación, humedad, polvo o cortocircuito	Detención del ciclo, sobrecalentamiento, disparo de protecciones
Daño en sensores inductivos o de presión	Ingreso de humedad, conexiones defectuosas, envejecimiento	Lecturas erráticas, fallos en la secuencia automática
Cortocircuito en cajas de conexión	Sellado deficiente, instalación defectuosa	Fallo completo del sistema eléctrico, riesgo de incendio

Tabla 17. Modos de fallas eléctricas del Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.3.3.6. Fallas por Lubricación

Una lubricación inadecuada o contaminada en componentes críticos puede acelerar el desgaste mecánico y provocar agarrotamientos. Estas fallas son prevenibles con un mantenimiento predictivo y uso de lubricantes adecuados.

Modo de falla	Posibles causas	Consecuencias / Síntomas
Fricción excesiva en ejes o engranajes	Falta de lubricación o uso de lubricante incorrecto	Desgaste prematuro, aumento de temperatura
Bloqueo o agarrotamiento de partes móviles	Lubricante contaminado con partículas o agua	Paro repentino, daños mecánicos
Fuga de lubricante	Sellos dañados, exceso de presión	Pérdida de lubricación efectiva, contaminación del entorno

Tabla 18. Modos de fallas de lubricación del Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.4. Análisis Modal de Efectos y Fallos

Siguiendo la etapa cuatro del modelo de Parra y Crespo (2015), se elaboró un análisis AMEF (Análisis Modal de Efectos y Fallos) para los grupos de equipos clasificados como críticos. Esta herramienta permite anticipar los modos de falla más relevantes de cada equipo, identificar

sus efectos y consecuencias, evaluar su nivel de riesgo y establecer acciones preventivas o correctivas antes de que ocurra una falla grave. El análisis se basa en información técnica obtenida de fabricantes, bibliografía especializada ya mencionada en la sección 8.3 y criterios de ingeniería preventiva. A continuación, se presentan las tablas AMEF por grupo de equipos.

10.4.1. AMEF – Bombas Centrífugas

Las bombas centrífugas desempeñan un rol clave en el sistema de tratamiento de aguas con relaves, siendo responsables del transporte continuo de fluidos entre las distintas etapas del proceso. Su funcionamiento sostenido en ambientes industriales exigentes caracterizados por la presencia de sólidos abrasivos, variaciones de caudal y requerimientos de alta confiabilidad, las convierte en equipos críticos con alta probabilidad de fallas si no se gestionan de forma adecuada. Estos equipos están sometidos a esfuerzos mecánicos, hidráulicos y eléctricos que requieren un monitoreo técnico riguroso para evitar pérdidas operacionales o daños al sistema.

Este Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) identifica y clasifica los modos de falla presentes en las bombas centrífugas, agrupándolos según su naturaleza técnica: mecánica, hidráulica, eléctrica, operacional y de lubricación. Para cada modo de falla se describen sus consecuencias observables, el impacto potencial sobre la seguridad, el medioambiente o la operación, así como las acciones recomendadas ya sean de tipo preventivo, correctivo o predictivo orientadas a evitar su aparición o reducir su impacto operativo.

10.4.1.1. Fallas Mecánicas – Bombas Centrífugas

En esta sección se presentan los modos de falla de origen mecánico identificados durante el análisis, con sus respectivas consecuencias, efectos sobre la operación y acciones recomendadas para su mitigación.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Desgaste por abrasión	Erosión en impulsor y carcasa	Sí	No	Reducción de caudal, caída de presión	Uso de materiales resistentes, revisión por horas	Correctiva
Falla de rodamientos	Ruido, sobrecalentamiento	Sí	Sí	Daño progresivo del eje y paro	Lubricación automática, análisis vibracional	Predictiva
Rotura de eje	Paro total e inmediato	Sí	Sí	Interrupción crítica del sistema	Control de carga, revisión periódica	Correctiva
Impulsor dañado o desbalanceado	Vibraciones, pérdida de eficiencia	Sí	No	Reducción hidráulica, fatiga en acoplamiento s	Reemplazo o balanceo dinámico programado	Preventiva
Desalineación entre motor y bomba	Vibraciones anormales	Sí	Sí	Desgaste acelerado de componentes	Alineación láser, verificación estructural	Correctiva
Fuga en sello mecánico	Entrada de aire y pérdida de fluido	Sí	Sí	Cavitación, parada del sistema	Cambio de sellos, revisión del sistema de presurización	Correctiva
Desgaste de poleas	Patinaje de correas, pérdida de torque	Sí	No	Reducción de eficiencia, sobrecarga de motor	Revisión visual, cambio periódico	Correctiva
Tensión incorrecta de correas	Ruptura prematura de correas	Sí	No	Interrupciones intermitentes	Tensado calibrado, mantenimiento o preventivo	Preventiva

Desalineación de poleas	Desgaste lateral de correas	Sí	No	Reducción de transmisión, riesgo de ruptura	Verificación de paralelismo, ajuste con plantilla o láser	Correctiva
-------------------------	-----------------------------	----	----	---	---	------------

Tabla 19. Análisis de modo de falla mecánica Bombas Centrifugas
Fuente: Creación Propia.

10.4.1.2. Fallas Hidráulicas – Bombas Centrifugas

En esta sección se presentan los modos de falla de origen hidráulico identificados durante el análisis, con sus respectivas consecuencias, efectos sobre la operación y acciones recomendadas para su mitigación.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Cavitación	Burbujeo, daño en impulsor	Sí	No	Pérdida de eficiencia	Revisar nivel de succión, instalar presostato	Correctiva
Obstrucción de impulsor	Caudal reducido	Sí	No	Vibración, desequilibrio hidráulico	Revisión de mallas, limpieza regular	Preventiva
Flujo insuficiente / caudal bajo	Rendimiento por debajo del diseño	Sí	No	Procesos posteriores afectados	Verificación de obstrucciones, revisión de velocidad	Correctiva
Pérdida de cebado	Entrada de aire, cavitación	Sí	No	Daño al impulsor y sello	Válvula de retención, revisión de válvulas de fondo	Correctiva

Vórtice en succión	Arrastre de aire	Sí	No	Fluctuaciones de caudal, cavitación	Diseño adecuado del sumidero, rejilla anti sólidos	Preventiva
--------------------	------------------	----	----	-------------------------------------	--	------------

Tabla 20. Análisis de modo de falla hidráulicas Bombas Centrifugas
Fuente: Creación Propia.

10.4.1.3. Fallas Eléctricas – Bombas Centrifugas

En esta sección se identifican los modos de falla de origen eléctrico y se sugieren medidas para asegurar un suministro estable y seguro.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Fallo de motor por sobrecarga	Protección disparada	Sí	No	Paro del sistema	Control de amperaje, monitoreo continuo	Correctiva
Fallo en arrancador/varificador	No arranque o arranque errático	Sí	No	Paro no planificado	Revisión del variador, ajustes de parámetros	Correctiva
Conexiones/alimentación deficiente	Caídas de tensión, disparos	Sí	No	Inestabilidad en operación	Mantenimiento eléctrico, torque de conexiones	Correctiva

Tabla 21. Análisis de modo de falla eléctrica Bombas Centrifugas
Fuente: Creación Propia.

10.4.1.4. Fallas Operacionales – Bombas Centrifugas

En esta sección se analizan las consecuencias operativas detectadas relacionada a modos de fallas operacionales, junto a sus acciones correctivas y control recomendadas para evitar la recurrencia de estas situaciones.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Funcionamiento en seco	Sobrecalentamiento, daño en sello	Sí	Sí	Falla crítica inmediata	Instalar sensor de nivel, alarma	Preventiva
Paradas y arranques frecuentes	Fatiga mecánica	Sí	No	Fallas aleatorias	Rediseño de control y automatización	Correctiva
Rotación inversa	Flujo invertido o nulo	Sí	No	Pérdida de eficiencia, daño a impulsor	Verificación de fase antes de puesta en marcha	Preventiva
Operación fuera del punto óptimo	Mayor consumo, baja eficiencia	No	No	Mayor desgaste y vibración	Curvas de rendimiento y rediseño hidráulico	Correctiva

Tabla 22. Análisis de modo de falla operacional Bombas Centrifugas
Fuente: Creación Propia.

10.4.1.5. Fallas de Lubricación – Bombas Centrifugas

En esta sección se abordan los modos de falla ligados a la lubricación y se plantean estrategias preventivas y predictivas para asegurar su correcto desempeño.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Lubricación insuficiente	Desgaste prematuro de rodamientos	Sí	No	Fallo prematuro	Automatizar relubricación, checklist de nivel	Preventiva
Contaminación del lubricante	Oxidación y corrosión interna	No	Sí	Fallas internas	Uso de sellos, análisis	Predictiva

				impredecibles	periódico de grasa	
Exceso de lubricante	Aumento de temperatura y presión	No	No	Pérdida de rendimiento y vida útil	Aplicación por volumen recomendado	Preventiva
Fallo en dispositivos de lubricación	No entrega de lubricante	Sí	Sí	Fallo súbito de rodamientos	Monitoreo de presión y nivel en sistema automático	Correctiva

Tabla 23. Análisis de modo de falla de lubricación Bombas Centrifugas
Fuente: Creación Propia.

10.4.2. AMEF Filtro Prensa y Unidad Hidráulica

El filtro prensa y su unidad hidráulica asociada desempeñan un rol esencial en el proceso de separación sólido-líquido del tratamiento de aguas con relaves, permitiendo obtener tortas con alto contenido de sólidos y un efluente líquido clarificado. Debido a su operación cíclica, alta presión de cierre y exigencias de sincronización mecánica, hidráulica y de control, estos equipos están expuestos a múltiples modos de falla que pueden comprometer su rendimiento y disponibilidad operativa. La unidad hidráulica, encargada de generar la fuerza necesaria para el cierre del sistema, es también crítica por su dependencia de presiones estables y componentes electromecánicos sensibles.

Este Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) identifica y clasifica los modos de falla de ambos equipos, agrupándolos según su naturaleza técnica: mecánica, hidráulica, eléctrica, de control y de operación. Para cada modo se detallan sus consecuencias técnicas, el impacto sobre la seguridad o el medioambiente, y las acciones recomendadas, ya sean preventivas, correctivas o predictivas con el fin de mitigar su ocurrencia o reducir sus efectos.

10.4.2.1. Fallas Mecánicas – Filtro Prensa

En esta sección se abordan los modos de falla mecánicos del filtro prensa, tales como desgaste de placas, acumulación de sólidos y fallas estructurales, proponiendo acciones correctivas y preventivas para mantener la integridad del sistema y evitar detenciones no programadas.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Desgaste o deformación de placas	Fugas ente placas	Sí	No	Filtrado deficiente	Reemplazo programado, inspección por ciclo	Correctiva
Acumulación de sólidos / atascos	No cierre adecuado	Sí	No	Interrupción de ciclo automático	Lavado de placas y control de operación	Preventiva
Fatiga o fisuras en bastidor	Deformación estructural	Sí	Sí	Colapso parcial y riesgo de accidente	Inspección estructural semestral	Predictiva
Falla en mecanismos de apertura	Movimiento irregular	Sí	No	Mayor tiempo de ciclo	Lubricación y revisión de sistema lineal	Correctiva

Tabla 24. Análisis de modo de falla mecánica Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.4.2.2. Fallas Hidráulicas – Filtro Prensa

En esta sección se analizan los modos de falla hidráulicos que afectan el cierre del filtro, como pérdida de presión o fuerza insuficiente, junto con estrategias de mantenimiento para asegurar una operación estable y eficiente.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Pérdida de presión de cierre	Cierre incompleto	Sí	No	Filtrado interrumpido	Verificación de presostatos, revisión de	Correctiva

						bomba hidráulica	
Fuerza de cierre insuficiente	Sellado deficiente	Sí	No	Mezcla de sólidos en rebose	de	Inspección de cilindros hidráulicos y válvulas	Correctiva
Golpes de ariete	Ruido fuerte, vibración	Sí	No	Daño en válvulas y tuberías	en	Revisión de purga de aire y válvulas de alivio	Preventiva

Tabla 25. Análisis de modo de falla hidráulica Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.4.2.3. Fallas Eléctricas – Filtro Prensa

Esta sección examina los modos de falla eléctricos del filtro prensa, principalmente en motores y sensores, estableciendo acciones preventivas para evitar interrupciones inesperadas en el ciclo de filtración.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Falla del motor eléctrico	Paro del sistema	Sí	No	Interrupción del ciclo	Monitoreo de carga y protecciones térmicas	Correctiva
Daño en sensores inductivos o de presión	Lecturas erróneas	No	No	Descoordinación del ciclo de apertura/cierre	Reemplazo y calibración de sensores	Correctiva
Cortocircuito en cajas de conexión	Disparo de protecciones	Sí	Sí	Riesgo de incendio y paro total	Sellado IP adecuado, revisión de bornes	Correctiva
Alimentación inestable o fases ausentes	Arranque defectuoso o vibración	Sí	No	Sobrecalentamiento y desgaste eléctrico	Verificación de red y sistema de protección de fases	Correctiva

Tabla 26. Análisis de modo de falla eléctrica Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.4.2.4. Fallas de Control – Filtro Prensa

Aquí se presentan los modos de falla relacionados al sistema de control automático del filtro prensa, abordando errores de PLC, pérdida de señales y fallos lógicos, junto a medidas correctivas para restablecer su funcionamiento secuencial.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Error en la lógica del PLC	Ciclo de apertura o cierre fallido	Sí	No	Secuencia interrumpida	Auditoría del programa, pruebas en seco	Correctiva
Pérdida de señales de sensores críticos	Ejecución errónea de órdenes	Sí	No	Fugas o aperturas incompletas	Verificación de cableado y redundancia	Correctiva
Interbloqueos anulados o desactivados	Riesgo de colisión o sobrecarga	Sí	Sí	Fallas de seguridad y parada crítica	Activación forzada de lógica de seguridad	Correctiva
Sobrevoltaje o picos eléctricos	Daño a entradas/salidas del PLC	No	Sí	Pérdida de control del sistema	Instalación de supresores y protectores	Preventiva

Tabla 27. Análisis de modo de falla de control Filtro Prensa
Fuente: Creación Propia.

10.4.2.5. Fallas Mecánicas – Unidad Hidráulica

Esta sección contempla los modos de falla mecánicos en componentes como bombas y conducciones hidráulicas, proponiendo estrategias de inspección y reemplazo para mantener la continuidad operativa del sistema.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Falla de bomba hidráulica	Pérdida de presión	Sí	No	Ciclo no ejecutado	Reemplazo por horas de uso,	Correctiva

					verificación de caudal	
Falla en motor eléctrico de bomba	Paro de bomba	Sí	No	Falta de presión hidráulica	Revisión de protecciones térmicas y carga	Correctiva
Rotura de mangueras o tuberías	Fuga de aceite	Sí	Sí	Parada del sistema, riesgo ambiental	Cambio por ciclo, uso de mangueras certificadas	Preventiva

Tabla 28. Análisis de modo de falla mecánica Unidad Hidráulica
Fuente: Creación Propia.

10.4.2.6. Fallas Eléctricas – Unidad Hidráulica

En esta sección se abordan los fallos eléctricos asociados a motores, contactores y solenoides de la unidad hidráulica, proponiendo acciones para garantizar una respuesta confiable ante la demanda de presión.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Falla del motor eléctrico	No funcionamiento de bomba	Sí	No	Falta de presión y detención del sistema	Monitoreo de corriente, aislamiento, torque de conexiones	Correctiva
Falla en bobinas o solenoides	Válvulas no activan	Sí	No	Pérdida de control hidráulico	Revisión de continuidad eléctrica y funcionamiento	Correctiva

Tabla 29. Análisis de modo de falla eléctrica Unidad Hidráulica
Fuente: Creación Propia.

10.4.2.7. Fallas de Control – Unidad Hidráulica

Esta sección presenta los modos de falla vinculados a presostatos y dispositivos de control, definiendo acciones predictivas y correctivas para mantener una regulación segura y eficaz de la presión hidráulica.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Error en presostato	Presión incorrecta detectada	No	Sí	Interrupción del ciclo de cierre	Calibración y cambio por horas de uso	Predictiva
Falla en contactores / relés	No arranque del motor	Sí	No	Pérdida total del sistema hidráulico	Reemplazo por ciclo, pruebas funcionales	Correctiva

Tabla 30. Análisis de modo de falla de control Unidad Hidráulica
Fuente: Creación Propia.

10.4.3. AMEF – Espesador High Rate

El espesador tipo High Rate constituye una etapa fundamental en el tratamiento de aguas con relaves, ya que permite la sedimentación acelerada de sólidos en suspensión, reduciendo el volumen de lodos y generando un rebose clarificado que puede ser recirculado o descargado. Su operación continua y su estructura de gran escala implican una exposición permanente a condiciones exigentes, tales como variabilidad en la carga de sólidos, acumulación de material, torque variable y necesidad de control en tiempo real. Estas condiciones lo convierten en un equipo crítico, con múltiples modos de falla que pueden afectar directamente la estabilidad del sistema de tratamiento.

Este Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) identifica y clasifica los modos de falla del espesador High Rate, organizándolos según su naturaleza técnica: mecánica, hidráulica, operacional, de control e instrumentación, eléctrica y de lubricación. Para cada modo se presentan sus consecuencias, el nivel de evidencia y el impacto sobre la operación, la seguridad o el medioambiente, junto con las acciones recomendadas preventivas, correctivas o predictivas, que permiten gestionar eficazmente los riesgos asociados a su funcionamiento.

10.4.3.1. Fallas Mecánicas – Espesador High Rate

En esta sección se abordan los modos de falla de carácter mecánico en el espesador, como el embancamiento del rastrillo, rotura de ejes o fallas en el sistema de elevación, proponiendo medidas preventivas y predictivas para evitar daños estructurales y pérdidas operativas.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Embancamiento del rastrillo	Aumento de torque, detención del mecanismo	Sí	Sí	Falla del sistema de arrastre	Control de dosificación, limpieza programada	Correctiva
Rotura del eje o brazos del rastrillo	Parada total, daño estructural	Sí	Sí	Intervención mayor	Monitoreo de torque, mantenimiento predictivo	Predictiva
Falla del reductor o motor	Pérdida de capacidad de torque	Sí	No	Sistema detenido	Lubricación, revisión de engranajes	Correctiva
Falla en sistema de elevación de rastras	Imposibilidad de alivio ante sobrecarga	Sí	Sí	Falla estructural por esfuerzo excesivo	Revisión de cilindros y válvulas	Correctiva

Tabla 31. Análisis de modo de falla mecánica Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.4.3.2. Fallas Hidráulicas – Espesador High Rate

Esta sección presenta los modos de falla hidráulicos asociados a obstrucciones, fugas y fallos en rebose, y propone acciones para asegurar el flujo controlado de lodos y prevenir derrames o rebalses que comprometan la estabilidad del proceso.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Obstrucción en línea de descarga	Bajo caudal, aumento de nivel, posible embancamiento	Sí	Sí	Interrupción del proceso	Limpieza preventiva	Correctiva

Desgaste de bomba de descarga	Caída de rendimiento, acumulación de sólidos	Sí	No	Falla en evacuación de lodos	Reemplazo periódico	Preventiva
Rotura de tuberías	Derrame de relaves, parada del sistema	Sí	Sí	Emergencia ambiental	Inspección estructural	Correctiva
Falla en rebose	Derrame no contenido, pérdida de agua clara	Sí	Sí	Descontrol del nivel superior	Mantenimiento de canaletas	Correctiva

Tabla 32. Análisis de modo de falla hidráulica Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.4.3.3. Fallas Operacionales – Espesador High Rate

En esta sección se detallan los modos de falla relacionados con la operación del espesador, como el sobreconsumo de floculante, baja densidad de descarga o turbidez en el rebose, junto con recomendaciones para optimizar parámetros operativos y mantener la eficiencia del sistema.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Alta turbidez en rebose	Pérdida de agua clara, menor recuperación	Sí	No	Calidad de agua no conforme	Ajuste de dosificación	Correctiva
Densidad insuficiente en descarga	Aumento de carga en filtros posteriores	Sí	No	Desempeño reducido de filtros	Optimización de operación	Correctiva
Rotación de cama de lodos	Rebase repentino, pérdida de control	Sí	Sí	Inestabilidad del sistema	Control de interfase y tiempos de retención	Correctiva
Sobreconsumo de floculante	Costos elevados, flóculos ineficientes	Sí	No	Eficiencia reducida del espesamiento	Monitoreo de dosificación	Correctiva

Tabla 33. Análisis de modo de falla operacional Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.4.3.4. Fallas de Instrumentación y Control – Espesador High Rate

Esta sección analiza los modos de falla asociados a sensores, instrumentos y lógica de control, estableciendo estrategias de mantenimiento preventivo y ajuste de parámetros para asegurar una operación automatizada precisa y confiable.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Sensores descalibrados	Lecturas erróneas, control deficiente	No	No	Decisiones incorrectas del sistema	Calibración periódica	Preventiva
Tecnología inadecuada de sensores	Mediciones no confiables	No	No	Control ineficaz	Reemplazo por equipos adecuados	Correctiva
Fouling de sensores	Lecturas falsas o nulas	No	No	Fallas de automatización	Limpieza regular	Preventiva
Estrategia de control mal ajustada	Oscilaciones, baja eficiencia	No	No	Desempeño inestable	Revisión y ajuste de parámetros	Correctiva

Tabla 34. Análisis de modo de falla Instrumentación y Control Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.4.3.5. Fallas Eléctricas – Espesador High Rate

En esta sección se examinan los modos de falla eléctricos que afectan el motor principal, sensores y conexiones del sistema, planteando acciones correctivas y medidas de protección para minimizar interrupciones o riesgos eléctricos.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Falla del motor eléctrico	Detención del ciclo, sobrecalentamiento	Sí	No	Paro del equipo	Protecciones térmicas, limpieza	Correctiva
Daño en sensores inductivos o de presión	Lecturas erráticas, fallos en la secuencia	No	No	Errores de control	Mantenimiento y revisión de señales	Correctiva

Cortocircuito en cajas de conexión	Fallo completo, riesgo de incendio	Sí	Sí	Pérdida del sistema eléctrico	Aislamiento y sellado adecuado	Correctiva
------------------------------------	------------------------------------	----	----	-------------------------------	--------------------------------	------------

Tabla 35. Análisis de modo de falla eléctrica Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia...

10.4.3.6. Fallas de Lubricación – Espesador High Rate

En esta sección se abordan los modos de falla ligados a la lubricación del sistema mecánico del espesador, como fugas, fricción excesiva o contaminación del lubricante, y se plantean estrategias preventivas y predictivas para asegurar su correcto desempeño y prolongar la vida útil de los componentes.

Modo de falla	Consecuencia	¿Evidente? (Sí/No)	¿Afecta seguridad, higiene o medioambiente? (Sí/No)	Efecto operacional	Acciones recomendadas	Tipo de acción
Fricción excesiva en ejes o engranajes	Desgaste prematuro, aumento de temperatura	No	No	Falla por fatiga mecánica	Selección correcta de lubricante	Preventiva
Bloqueo o agarrotamiento de partes móviles	Paro repentino, daños mecánicos	Sí	Sí	Detención crítica del sistema	Filtrado de lubricante, inspección	Correctiva
Fuga de lubricante	Pérdida de lubricación, contaminación	Sí	Sí	Fallos mecánicos y riesgo ambiental	Revisión de sellos, sistema de presurización	Correctiva

Tabla 36. Análisis de modo de falla de lubricación Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia.

10.5. Frecuencias y Tiempos de Ejecución del Mantenimiento en Equipos Críticos

Este capítulo presenta un análisis técnico de los modos de falla y las estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo para tres conjuntos de equipos críticos involucrados en el sistema de tratamiento y recuperación de agua en la planta de relaves de Polpaico Soluciones S.A. La revisión abarca un total de nueve bombas centrífugas, un espesador de alta velocidad (High Rate), dos filtros prensa y dos unidades hidráulicas asociadas. La selección de estos equipos

responde al resultado del análisis de criticidad (CTR) y al posterior desarrollo del análisis modal de efectos y fallos (AMEF), lo que permitió identificar sus principales vulnerabilidades operativas.

Dado que la planta aún no se encuentra en funcionamiento, el enfoque adoptado es de carácter preventivo y predictivo, dejando fuera las acciones correctivas que serán definidas en una etapa posterior, una vez se disponga de historial de fallas. Las estrategias aquí descritas consideran condiciones de operación, modos de falla más probables según artículos y experiencia del equipo de mantenimiento, síntomas observables y frecuencias recomendadas para las intervenciones, ya sean diarias, semanales, mensuales o anuales. El objetivo de este capítulo es entregar lineamientos técnicos que permitan minimizar la probabilidad de fallas funcionales, asegurar la disponibilidad operativa de los equipos desde su puesta en marcha y contribuir a la sostenibilidad del sistema de tratamiento de aguas mediante una planificación de mantenimiento robusta y anticipada.

10.5.1. Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas operan en condiciones exigentes, trasladando agua de enfriamiento, lechadas y suspensiones. Entre las fallas más comunes se encuentran daños en rodamientos, desbalance o erosión del impulsor, problemas de transmisión como correas flojas, cavitación por formación de vórtices y obstrucciones internas (CRYOSPAIN, 2022; Waldron, 2020). Estas fallas no solo disminuyen el rendimiento hidráulico, sino que pueden derivar en averías catastróficas si no se detectan a tiempo.

El mantenimiento predictivo, basado en el monitoreo de vibraciones y temperatura, permite anticipar fallas en los rodamientos. A su vez, la inspección del impulsor, el balance dinámico y la verificación de la alineación son estrategias preventivas clave. Estudios de confiabilidad indican que el tiempo promedio de reparación tras una falla se sitúa entre 6 y 8 horas (Helix2010, 2015),

estos valores fueron contrastados con Fernando Rivas (2024) jefe de mantenimiento preventivo y predictivo. Estas actividades deben programarse con una frecuencia diaria, mensual o anual, dependiendo de la criticidad y las condiciones operativas de cada componente.

Modo de falla	Tiempo de reparación (h)	Tipo de mantenimiento	Frecuencia de mantenimiento
Falla de rodamientos (sobrecalentamiento, ruido excesivo)	~6–8 horas (reemplazo del rodamiento y alineación).	Predictivo: Monitoreo de vibraciones y temperatura para detectar desgaste incipiente. Lubricación automática o periódica para evitar seco.	Semanal: monitorear temperatura/ruido. Mensual: medición vibracional o análisis de condición. Trimestral: engrase/aceite de rodamientos (cada ~2000 h).
Impulsor dañado o desbalanceado (vibraciones, cavitación)	~8 horas (desmontaje y cambio o balanceo del impulsor).	Preventivo: Inspección programada del impulsor y ajuste de balance durante paros mayores. Reemplazo preventivo si hay desgaste >3 mm en álabes.	Anual (8000 h): inspeccionar impulsores en mantenimiento mayor y reemplazar si están erosionados o deformados. Continuo: vigilar presión/caudal para detectar caída de rendimiento (indicativa de desgaste).
Tensión incorrecta de correas (patinan o se rompen prematuramente)	~1–2 horas (ajuste o cambio de correa).	Preventivo: Inspección regular de las correas y sus tensores; reemplazo según condición antes de falla.	Mensual: verificar estado y tensión de correas (buscar grietas, holgura). Anual: reemplazo de correas y rodillos tensores si aplica, siguiendo recomendaciones del fabricante.
Obstrucción de impulsor (atasco por sólidos, caudal reducido)	~2–4 horas (parada, desmontaje de carcasa y limpieza de impurezas).	Preventivo: Filtrado y limpieza periódica en la succión para evitar ingreso de objetos. Revisiones visuales rutinarias del estado interno cuando la bomba lo permita.	Semanal: revisar filtro o rejilla de succión, verificar que no haya bloqueos ni entrada de aire. Semanal: inspección visual de caudal y presión; limpieza si se detecta reducción.

<p>Vórtice en succión (cavitación) (entrada de aire, fluctuaciones de caudal)</p>	<p>~8 horas (si hubo daño por cavitación, reparar impulsor/ojales).</p>	<p>Preventivo: Mejoras de diseño operativo para evitar vórtices (suficiente nivel en sumidero, placas antivórtice). Monitoreo de sonido/vibración para detección de cavitación.</p>	<p>Continuo: asegurar condiciones de succión adecuadas (nivel de sump, válvulas purga de aire). Mensual: revisar sistema de succión en busca de aireación o cavitación incipiente (vibraciones anómalas).</p>
--	---	--	---

Tabla 37. Frecuencias, tiempos de intervención y acciones de mantenimiento en Bombas Centrífugas
Fuente: Creación Propia.

10.5.2. Filtros prensa con unidad hidráulica

Los filtros prensa son fundamentales en el tratamiento de efluentes y lodos dentro de plantas cementeras. Funcionan mediante placas filtrantes y una unidad hidráulica encargada de aplicar la presión de cierre. Las fallas frecuentes incluyen acumulación de sólidos, golpes de ariete, fugas hidráulicas, sobretensiones eléctricas y problemas de lubricación (Jmark Systems, s.f.; Intecpros, 2012). De no atenderse a tiempo, estas fallas pueden ocasionar desde paradas menores hasta daños estructurales.

Las estrategias de mantenimiento incluyen la limpieza frecuente de las placas, inspecciones visuales diarias, calibración de sensores, reemplazo periódico de aceite y filtros, y el cambio programado de mangueras hidráulicas. También es recomendable monitorear la temperatura del aceite hidráulico y realizar análisis periódicos de lubricantes, ya que el sobrecalentamiento y la contaminación son causas frecuentes de fallos.

Modo de falla	Tiempo de reparación (h)	Tipo de mantenimiento	Frecuencia de mantenimiento
<p>Acumulación de sólidos/atascos (placas o portacake obstruidos, ciclo se detiene)</p>	<p>~2–3 horas (limpieza manual de placas y colectores).</p>	<p>Preventivo: Limpieza frecuente de placas y telas filtrantes antes de que se saturen. Retiro de tortas residuales entre ciclos</p>	<p>Por ciclo: retirar y lavar tortas después de cada prensado. Semanal: limpieza general del filtro (evitar lodos secos pegados).</p>

		para evitar incrustaciones.	Mensual: lavado a presión o enjuague químico leve de telas filtrantes para evitar cegado.
Golpe de ariete (picos de presión en tuberías de alimentación, vibraciones violentas)	4–6 horas (revisión de tuberías, juntas; posible reemplazo de secciones dañadas).	Preventivo: Control del régimen de bombeo y válvulas para evitar cierres bruscos. Instalar amortiguadores de pulsaciones (acumuladores) en la línea de alimentación para absorber sobrepresiones.	En continuo: operación cuidadosa de válvulas (evitar cierres súbitos de bombas). Trimestral: inspeccionar soportes de tuberías y acumuladores. Semestral: verificar carga de gas del amortiguador de pulsos (si existe).
Sobretensión eléctrica (picos de voltaje, sobrevoltajes de red)	1–2 horas (resetear protección, cambiar fusibles o componentes electrónicos dañados).	Preventivo: Protección eléctrica mediante supresores de sobretensión y UPS. Verificar la integridad de sistemas de tierra y pararrayos para desviar picos transitorios.	Mensual: inspección visual de paneles eléctricos y registros de eventos de sobretensión. Anual: mantenimiento del UPS (baterías) y pruebas de los protectores de picos (reemplazo si han actuado repetidamente).
Fugas en empaquetaduras/sellos (pérdida de fluido hidráulico, presión insuficiente)	1–2 horas (ajuste o cambio de empaquetadura/sello).	Preventivo: Inspección rutinaria de posibles fugas en sellos y juntas; apriete o sustitución antes de que falle completamente. Uso de sellos mecánicos de calidad y lubricación adecuada para reducir desgaste.	Semanal: revisar visualmente que no haya goteos en el cilindro hidráulico ni en uniones (sellos secos). Trimestral: reemplazar empaquetaduras o sellos mecánicos con desgaste, sin esperar a fuga grave (según horas de servicio).
Lubricación insuficiente (componentes secos o con aceite degradado, provoca sobrecalentamiento o desgaste prematuro)	6–8 horas (si provoca avería mayor: cambiar piezas gripadas, etc.). Si se detecta a tiempo: <1 hora (reposicionar lubricante).	Predictivo: Monitoreo del nivel y calidad de aceite hidráulico y de lubricantes en guías/deslizaderas. Análisis periódico de aceite para detectar degradación antes de fallos. Sistemas automáticos de lubricación donde aplique (engrase de guías).	Semanal: verificar nivel de aceite hidráulico y estado (color/claridad). 500 h (~3 meses): análisis de aceite (viscosidad, partículas) si se busca extender cambios. Anual (2000 h): cambio de aceite hidráulico y filtro (hasta 2 años/4000 h con buen análisis de aceite).
Rotura de mangueras o tuberías (fuga súbita de aceite, pérdida de presión)	2–4 horas (sustitución de la manguera y recarga de aceite).	Preventivo: Inspección frecuente de mangueras hidráulicas para detectar	Semanal: observar si hay rezumos o gotas en conexiones de mangueras.

		grietas, abultamientos o rezumes. Reemplazo programado de mangueras tras cierta vida útil, antes de su fallo catastrófico.	Mensual: inspeccionar todas las mangueras a fondo; ajustar abrazaderas. Bienal: reemplazo de mangueras críticas por tiempo de servicio (aunque no muestren daño visible).
Error en presostato/sensor de presión (lecturas erráticas, ciclos de bombeo inestables)	1–2 horas (calibración o cambio del presostato/sensor).	Preventivo: Calibración periódica de los transductores de presión, comparándolos con manómetros patrón. Verificación del funcionamiento de instrumentos en rutinas de inspección.	Mensual: comprobar lectura de presión vs. manómetro de referencia (para detectar desvíos). Anual: calibración formal de transductores con equipo certificado; reemplazo si fuera necesario para asegurar precisión.
Sobrecalentamiento de aceite hidráulico (temperatura de aceite fuera de rango, pérdida de viscosidad)	3–5 horas (enfriamiento forzado, reemplazo de aceite deteriorado; revisar enfriador).	Predictivo: Monitoreo continuo de la temperatura del aceite durante la operación, con alarmas si excede límite. Asegurar buen funcionamiento del sistema de enfriamiento (ventiladores, intercambiadores limpios). Análisis de aceite para detectar signos de degradación térmica.	Continuo: sensor de temperatura en el circuito hidráulico con alarma. Semanal: comprobar que la temperatura de operación esté en rango nominal. Mensual: limpiar radiadores o enfriadores de aceite; eliminar suciedad que dificulte la disipación.
Filtro de aceite saturado (flujo restringido, variaciones de presión)	0.5–1 hora (cambio del elemento filtrante).	Preventivo: Reemplazo periódico del filtro de aceite hidráulico antes de que alcance saturación. Utilizar manómetros delta-P o indicadores de filtro para saber cuándo cambiarlo. Siempre cambiar filtro junto con cada cambio de aceite.	Semanal: vigilar indicadores de filtro (si presión diferencial alta). 2000 h / 1 año: cambio rutinario de filtro hidráulico junto al aceite, o antes si el aceite se contamina antes.
Vibraciones por desalineación (bomba-motor desalineados, ruidos y vibración)	2–3 horas (alineación con calibrador láser; ajuste de acoples).	Preventivo: Alineación correcta del motor y la bomba hidráulica tras cualquier intervención, y revisiones periódicas de la alineación de	Mensual: verificar apriete de pernos base y estado de soportes (sin holguras). Trimestral: medición de alineación de ejes o

		acoplamientos. Inspección de soportes y anclajes de la unidad (aflojamiento puede causar desalineación).	acoples, corrigiendo desviaciones. Siempre tras cambiar un motor o bomba, realinear antes de operar.
--	--	---	---

Tabla 38. Frecuencias, tiempos de intervención y acciones de mantenimiento en Filtro Prensa y Unidad Hidráulica
Fuente: Creación Propia.

10.5.3. Espesador High Rate

Los espesadores de alta velocidad son críticos en la separación sólido-líquido, especialmente en el tratamiento de relaves. Las fallas típicas incluyen sensores descalibrados, problemas en los rodamientos del rastrillo, pérdida de torque por fallas en el motor reductor, obstrucciones en válvulas de rebose y deficiencias en la lubricación del sistema (Dynamox, 2024; JXSC, 2022).

Para garantizar su operatividad, se recomienda implementar mantenimiento predictivo mediante análisis de vibraciones, monitoreo de torque, control de temperatura del aceite, limpieza regular de canaletas y calibración de sensores. La lubricación constante del sistema de elevación del rastrillo y del reductor es esencial para prevenir fallas graves. La frecuencia de estas actividades debe ajustarse al nivel de uso del equipo, con inspecciones semanales, mantenimientos mensuales y renovación anual de aceites y grasas (Enrique, 2025; JXSC, 2022)

Modo de falla	Tiempo de reparación (h)	Tipo de mantenimiento	Frecuencia de mantenimiento
Sensores descalibrados (nivel de cama, torque, etc. dan lecturas erróneas)	1–2 horas (calibración in situ con patrón, ajuste de cero/escala).	Preventivo: Calibración regular de sensores críticos (nivel de interface, torque de rastrillo) para asegurar medidas fiables. Verificación funcional en inspecciones de rutina.	Semanal: observar si las lecturas de nivel/torque son coherentes con las condiciones (detectar desviaciones anómalas). Mensual: prueba funcional de sensores (comparar con medidas manuales o referencias). Anual: calibración completa de instrumentos de nivel y torque con equipos patrón.

<p>Fallo de rodamientos en rastrillo (ruido, vibración en el mecanismo central)</p>	<p>~8 horas (reemplazo del rodamiento del equipo de giro del rastrillo; requiere desarmar reductor y soportes).</p>	<p>Predictivo: Monitoreo de vibraciones y ruidos en el reductor central y cojinetes del mecanismo para detectar desgaste incipiente. Lubricación constante de estos rodamientos (engrase automático o periódico) para prolongar su vida.</p>	<p>Semanal: escuchar ruidos inusuales y medir vibraciones en el motor/reductor del espesador. Quincenal: verificar nivel y condición del aceite del reductor; reponer si es necesario. Trimestral: análisis de vibración estructurada o termografía en cojinetes críticos. Anual: renovación de grasa/aceite de cojinetes y ajuste del rastrillo en parada general.</p>
<p>Pérdida de torque por motor defectuoso (motor del reductor con fallas eléctricas o mecánicas, el rastrillo no gira con fuerza)</p>	<p>4–6 horas (cambio del motor o reparación del sistema de accionamiento eléctrico).</p>	<p>Preventivo/Predictivo: Inspección eléctrica del motor (medición de amperaje, aislamiento) y mantenimiento preventivo (limpieza interna, cambio de baleros) según horas de servicio. Monitoreo continuo de la carga y rendimiento del motor: cualquier caída anormal de torque o alza de corriente disparará intervención.</p>	<p>Mensual: registrar amperaje del motor y comparar con valores de referencia para detectar sobrecargas o pérdidas de eficiencia. Anual: mantenimiento del motor (limpieza, lubricación, pruebas eléctricas) en parada mayor. Continuo: sistema de monitoreo de torque o corriente que alerte desviaciones significativas (permite planificar reemplazo antes de falla).</p>
<p>Válvulas de rebose obstruidas (salida de clarificado bloqueada por algas, incrustaciones; riesgo de rebalse)</p>	<p>2–3 horas (limpieza de la canaleta de rebose, válvulas y tuberías asociadas).</p>	<p>Preventivo: Limpieza periódica de las canaletas y válvulas de rebose para remover lodos flotantes, incrustaciones de cemento u otros sólidos acumulados. Inspección visual frecuente para garantizar flujo libre del sobrenadante.</p>	<p>Semanal: retirar acumulaciones en canaletas de rebose (espumas, sólidos flotantes). Mensual: abrir y limpiar válvulas de salida y tuberías de vertido; verificar que los vertederos estén despejados. Trimestral: lavado con agua a presión o químico suave si hay depósitos adheridos en las salidas.</p>
<p>Lubricación deficiente (engranajes del reductor o sistema de elevación del rastrillo con lubricante insuficiente, provoca desgaste)</p>	<p>8+ horas (si hay avería grave: reparación del reductor, reemplazo de engranajes dañados). Si se corrige a tiempo: <1 hora (recarga de aceite/engrase).</p>	<p>Predictivo: Vigilancia continua del nivel de aceite en el reductor y del correcto funcionamiento del sistema de lubricación del rastrillo. Análisis de aceite periódico para detectar partículas metálicas (desgaste).</p>	<p>Semanal: inspeccionar nivel de aceite del reductor y revisar visualmente lubricación en puntos móviles (sin signos de resequedad). Quincenal: engrasar guías de elevación de rastrillos y comprobar su recorrido completo</p>

		Incorporar alarmas de bajo nivel o presión de lubricación.	para garantizar lubricación adecuada en todo el trayecto. Anual: cambio de aceite del reductor y limpieza de sus filtros; verificar estado de líneas de lubricación.
--	--	--	--

Tabla 39. Frecuencias, tiempos de intervención y acciones de mantenimiento en Espesador High Rate
Fuente: Creación Propia

10.5.4. Incorporación del Inspector VOSO como complemento sensorial al plan de mantenimiento predictivo

La implementación de un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los equipos críticos de la planta de tratamiento de aguas y relaves —como bombas centrífugas, filtros prensa, unidades hidráulicas y espesador High Rate— se ve fortalecida con la incorporación del Inspector VOSO, responsable de aplicar la metodología VOSO. Este rol técnico actúa como un complemento sensorial a las rutinas calendarizadas, aportando una capa adicional de monitoreo en terreno mediante rondas de inspección sistemáticas. Su presencia permite detectar señales tempranas de fallas, mejorar la confiabilidad operativa y optimiza

El inspector realiza rondas semanales programadas, aplicando el método VOSO para identificar de forma precoz condiciones anómalas que podrían anticipar fallas funcionales. Estas inspecciones se ejecutan sin detener los equipos, permitiendo detectar desviaciones como vibraciones irregulares, fugas incipientes, olores a sobrecalentamiento, o ruidos mecánicos fuera de norma. Según Dynamox (2023), este tipo de inspección sensitiva resulta clave en ambientes industriales exigentes, ya que entrega una primera barrera de alerta temprana frente a deterioros que aún no son detectables mediante monitoreo instrumental.

Además, el VOSO cumple un rol clave en la verificación del cumplimiento de estándares de seguridad, orden y limpieza (5S), reportando condiciones subestándares y generando acciones

correctivas inmediatas o programadas (Vier, 2023). Esta doble función —técnica y conductiva— fortalece no solo la confiabilidad operativa de los equipos, sino también el entorno productivo en su conjunto.

En plantas nuevas como la de Polpaico Soluciones S.A., donde aún no existen datos históricos de fallas, la implementación de rondas semanales por parte del VOSO permite establecer una base inicial de observaciones sistemáticas, facilitar la construcción de tendencias operativas y acelerar el proceso de maduración del plan de mantenimiento. Rosales (2023) destaca que el registro disciplinado de hallazgos sensoriales permite alimentar el sistema de gestión de mantenimiento (CMMS), optimizando el momento de intervención y fortaleciendo la trazabilidad de activos.

En sí, la figura del inspector VOSO no busca reemplazar las actividades programadas, sino que las complementarlas de forma predictiva, integrando observación sensorial, seguridad y orden en terreno. Su ejecución con frecuencia semanal mínima contribuye a mejorar la disponibilidad operativa, reducir tiempos muertos no planificados y consolidar una cultura de confiabilidad desde el arranque del sistema de tratamiento de relaves.

10.6. Programación del mantenimiento para equipos críticos

La planificación del mantenimiento técnico en instalaciones industriales debe contemplar no solo las frecuencias establecidas por el fabricante o las recomendaciones generales de ingeniería, sino también la realidad operacional del sistema, su criticidad, condiciones ambientales y el nivel de instrumentación disponible. En el contexto de la planta de tratamiento y depósito de relaves de Polpaico Soluciones S.A., se ha propuesto una programación orientada particularmente

a los equipos de criticidad alta, según el análisis desarrollado en los capítulos anteriores y cuyas acciones fueron detalladas previamente en las Tablas Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39.

Estas tablas entregan los lineamientos técnicos para la ejecución calendarizada de las tareas de mantenimiento, diferenciando claramente los modos de falla más comunes, los tiempos promedio de intervención, el tipo de mantenimiento (predictivo, preventivo) y su frecuencia recomendada.

Además, cabe destacar que, para estos activos, se establecen frecuencias conservadoras en etapas iniciales, con el fin de anticipar comportamientos anómalos, reducir el riesgo de fallas funcionales e identificar patrones de degradación que permitan ajustar futuras intervenciones bajo un enfoque de mejora continua. Esta planificación está alineada con la filosofía del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), que sugiere iniciar con monitoreos frecuentes y luego optimizar las frecuencias en base al comportamiento observado (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015; Hall, 2025).

10.6.1. Rol del Inspector VOSO como disparador predictivo

El Inspector VOSO cumple una función clave en este esquema. A través de sus rondas semanales y uso del método sensitivo (Ver, Oír, Sentir, Oler), permite detectar señales precoces que pueden derivar en una solicitud de análisis instrumental, incluso en equipos catalogados como no críticos, activando intervenciones ad-hoc sin necesidad de una calendarización estricta. De este modo, el VOSO opera como una capa sensorial anticipada, complementando el monitoreo predictivo instrumentado (Rosales, 2023).

10.6.2. Frecuencias programadas

A continuación, se presenta un resumen de frecuencias propuestas para los principales tipos de mantenimiento aplicables a equipos críticos de la planta:

Conjunto de equipos	Actividad técnica	Frecuencia	Tipo de mantenimiento
Bombas centrífugas	Monitoreo de vibraciones y temperatura	Semanal	Predictivo – instrumental
Bombas centrífugas	Análisis vibracional de rodamientos	Mensual	Predictivo – condición
Bombas centrífugas	Engrase automático o periódico	Trimestral	Preventivo – calendarizado
Bombas centrífugas	Inspección visual de impulsor	Anual (~8000 h)	Preventivo – estructural
Bombas centrífugas	Verificación de tensión y estado de correas	Mensual	Preventivo – visual
Bombas centrífugas	Reemplazo de correas y tensores	Anual	Preventivo – calendarizado
Bombas centrífugas	Limpieza de impulsor y rejillas de succión	Semanal	Preventivo – operativo
Bombas centrífugas	Revisión de sistema de succión y aireación	Mensual	Preventivo – hidráulico
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Limpieza manual de placas y portacake	Por ciclo / Semanal	Preventivo – operativo
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Lavado a presión o químico de telas	Mensual	Preventivo – limpieza
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Revisión de golpes de ariete / acumuladores	Trimestral / Semestral	Preventivo – hidráulico
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Verificación eléctrica / sobrevoltaje	Mensual / Anual	Preventivo – eléctrico
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Inspección de empaquetaduras / sellos	Semanal / Trimestral	Preventivo – hidráulico
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Análisis y revisión de aceite hidráulico	Semanal / 500h / Anual	Predictivo – lubricación
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Reemplazo de aceite y filtros hidráulicos	2000h / 1 año	Preventivo – calendarizado
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Revisión y reemplazo de mangueras hidráulicas	Semanal / Bienal	Preventivo – seguridad
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Calibración de presostatos / transductores	Mensual / Anual	Preventivo – control
Filtros prensa + Unidad hidráulica	Verificación de alineación bomba-motor	Trimestral / post-intervención	Preventivo – mecánico
Espesador High Rate	Calibración de sensores de nivel / torque	Semanal / Mensual / Anual	Preventivo – control

Espesador High Rate	Análisis de vibraciones y torque del rastrillo	Semanal	Predictivo – instrumental
Espesador High Rate	Escucha de ruidos / vibraciones del motor	Semanal	Predictivo – sensorial
Espesador High Rate	Análisis de aceite del reductor	Trimestral	Predictivo – lubricación
Espesador High Rate	Cambio de aceite del reductor	Anual	Preventivo – calendarizado
Espesador High Rate	Limpieza de canaletas y válvulas de rebose	Semanal / Mensual	Preventivo – operativo
Espesador High Rate	Lavado químico de rebose	Trimestral	Preventivo – limpieza
Espesador High Rate	Revisión del sistema de elevación de rastrillo	Quincenal	Preventivo – mecánico
Espesador High Rate	Verificación de engrase de guías	Quincenal	Preventivo – lubricación
Espesador High Rate	Inspección de torque / amperaje del motor	Mensual	Predictivo – eléctrico
Todos los equipos críticos	Rondas de inspección sensitiva VOSO	Semanal	Predictivo – sensorial

Tabla 40. Frecuencias de Mantenimiento Programados, Equipos Críticos.


10.6.3. Ajustes dinámicos y mejora continua

Esta programación debe ser incorporada al sistema CMMS de la planta para permitir el registro automático de alertas, trazabilidad de tareas y ajuste dinámico de frecuencias según el análisis de tendencias. Como señala Jaishankar Balachandran (s.f.) en MaintWiz, el enfoque moderno de mantenimiento predictivo se basa en la alimentación cruzada entre inspecciones sensoriales (VOSO), instrumentales (vibraciones, temperatura) y el historial registrado en el software de gestión.








Asimismo, la recomendación general es mantener esta programación durante el primer año de operación y luego evaluarla en función del rendimiento real, la cantidad de fallas evitadas, la tasa de disponibilidad obtenida y la eficiencia en la ejecución de las tareas. El equipo técnico de mantenimiento deberá validar periódicamente la pertinencia de los ciclos definidos y proponer ajustes bajo un enfoque de mejora continua.

10.7. Programación del mantenimiento para equipos no críticos

Aunque los equipos no críticos presentan menor impacto operacional frente a una falla, su mantenimiento preventivo sigue siendo indispensable para mantener la continuidad del servicio, evitar costos acumulados por deterioro progresivo y garantizar condiciones seguras de operación. De acuerdo con buenas prácticas compartidas por empresas especializadas en mantenimiento industrial como Tecnofluidos del Golfo (2025), los equipos industriales deben recibir intervenciones planificadas cada 3 a 6 meses, dependiendo del tipo de componente y su exigencia operativa.



FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EQUIPOS INDUSTRIALES

EQUIPO		FRECUENCIA RECOMENDADA
	Bombas centrífugas	Cada 3 a 6 meses
	Motores eléctricos	Cada 6 meses
	Compresores	Cada 3 meses
	Tornos y fresadoras	Cada 6 meses
	Generadores	Cada 3 a 6 meses
	Válvulas industriales	Cada 3 meses
	Tableros eléctricos	Cada 6 meses

Estos rangos son generales y deben ajustarse según:

- Horas de operación
- Condiciones ambientales
- Recomendaciones del fabricante
- Criticidad del proceso

Recuerda: Un plan de mantenimiento preventivo bien estructurado prolonga la vida útil de los activos, mejora la productividad y reduce costos por fallas.

Comparte esta información con tu equipo de mantenimiento.

Figura 4. Frecuencia de mantenimiento preventivo para equipos industriales.
Fuente:

En la planta de tratamiento de relaves de Polpaico Soluciones S.A., los equipos que no fueron clasificados como críticos (ver Tabla 44), tales como compresores, motores eléctricos auxiliares, válvulas, tableros y sistemas de respaldo, serán atendidos bajo el siguiente esquema preventivo:

Tipo de equipo	Frecuencia recomendada	Tipo de mantenimiento
Bombas centrífugas no críticas	Trimestral o Semestral	Preventivo – mecánico/lubricación
Motores eléctricos secundarios	Semestral	Preventivo – eléctrico
Compresores de servicio	Trimestral	Preventivo – condición
Válvulas industriales y actuadores	Trimestral	Preventivo – funcional
Tableros eléctricos y control	Semestral	Preventivo – visual / eléctrico
Equipos auxiliares (tecles, duchas)	Semestral	Preventivo – operativo

Tabla 41. Frecuencia de Mantenimiento, Equipos no Críticos.

Cabe destacar que esta frecuencia puede variar ya que tal como se menciona en la Figura 4 por parte de Tecnofluidos del Golfo (2025) esta debe ser ajustada según horas de operación, recomendaciones del fabricante y si la criticidad del proceso luego de la puesta en marcha.

10.7.1. Integración con rondas VOSO en equipos no críticos

Adicionalmente, se establece que todos los equipos restantes de la planta deben ser inspeccionados sensorialmente por el Inspector VOSO, al menos una vez por semana. Este procedimiento busca complementar el mantenimiento programado mediante la detección precoz de condiciones anómalas como ruidos inusuales, vibraciones, fugas, sobrecalentamientos u olores anormales, que podrían anticipar fallas funcionales (Cruz, 2025).

Esta estrategia cumple una doble función:

- Permite ajustar las frecuencias de intervención en función de la condición real observada.

- Fortalece la trazabilidad del mantenimiento mediante el registro disciplinado de hallazgos y activación temprana de órdenes de trabajo.

En equipos no críticos que presenten reiteración de alertas sensoriales o fallas emergentes detectadas por el VOSO, se evaluará su reclasificación como equipo crítico, modificando la frecuencia de mantenimiento y su seguimiento instrumental.

10.8. Cronograma semestral consolidado de mantenimiento

Con el fin de facilitar la planificación, coordinación y ejecución de las tareas definidas en las secciones anteriores, se elaboró un cronograma semestral consolidado de mantenimiento que integra todas las actividades calendarizadas para los equipos críticos y no críticos de la planta durante las semanas 1 a 26 del año. Este cronograma permite representar gráficamente la distribución temporal de las acciones de mantenimiento, diferenciando sus frecuencias, duraciones y tipo de intervención (predictiva, preventiva o sensitiva).

La programación se construyó a partir de las frecuencias especificadas en las Tablas 37, 38 y 39, complementadas por el rol del inspector VOSO como elemento sensorial transversal. Las actividades incluidas abarcan desde inspecciones semanales hasta tareas semestrales como cambios de aceite, análisis de condición o calibraciones de sensores. De esta forma, se asegura una cobertura sistemática del parque de activos, alineando la ejecución técnica con la criticidad operativa de cada equipo.

En la Figura 5 se presenta el cronograma semestral, donde cada barra representa una tarea de mantenimiento programada. El eje horizontal muestra las semanas del año, mientras que el eje vertical agrupa las actividades por conjunto de equipos. Las inspecciones VOSO —de carácter

sensorial— aparecen distribuidas de forma recurrente, reforzando el enfoque preventivo del plan, mientras que actividades técnicas más especializadas se programan según su periodicidad óptima.

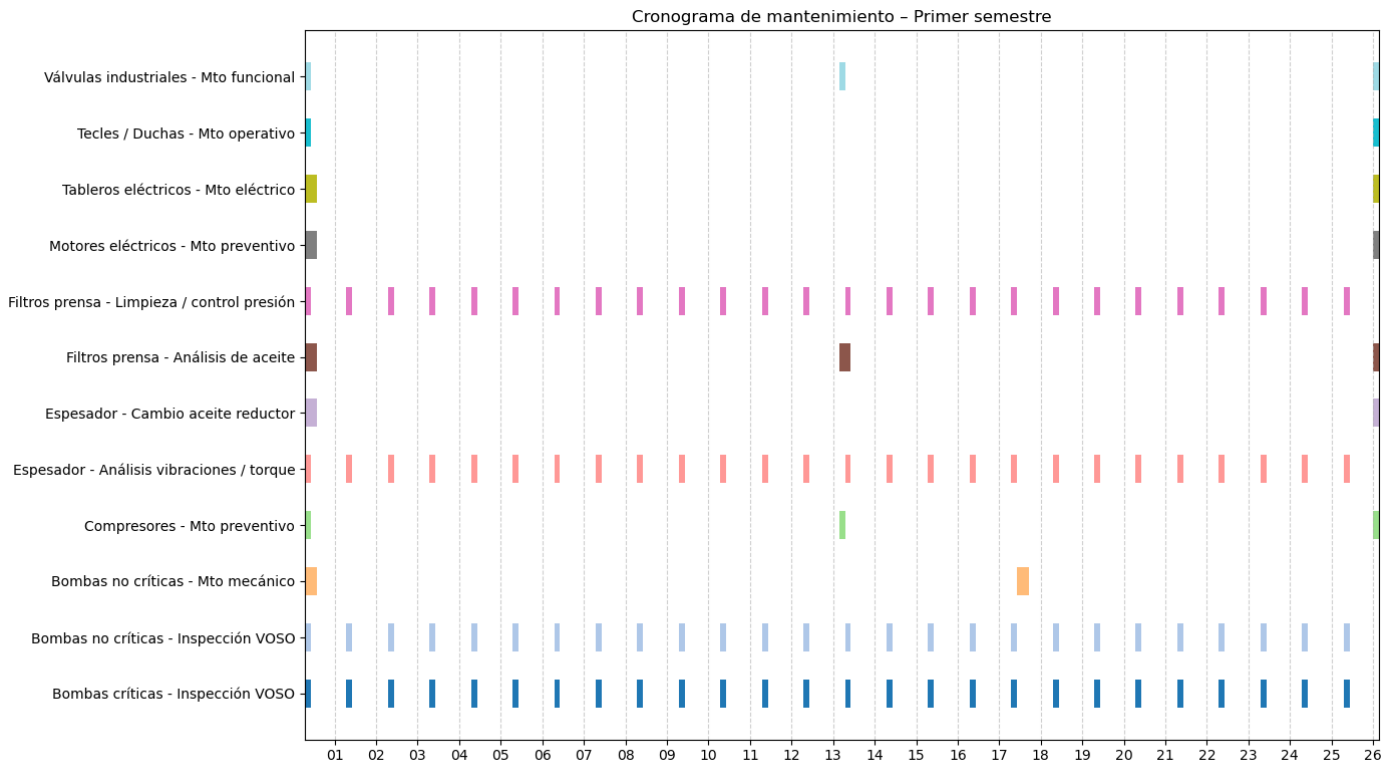


Figura 5. Cronograma de mantenimiento Semestral

Fuente: Creación Propia

La leyenda de actividades se presenta en una figura independiente (Figura 6), con el fin de mantener una lectura limpia y ordenada del cronograma.

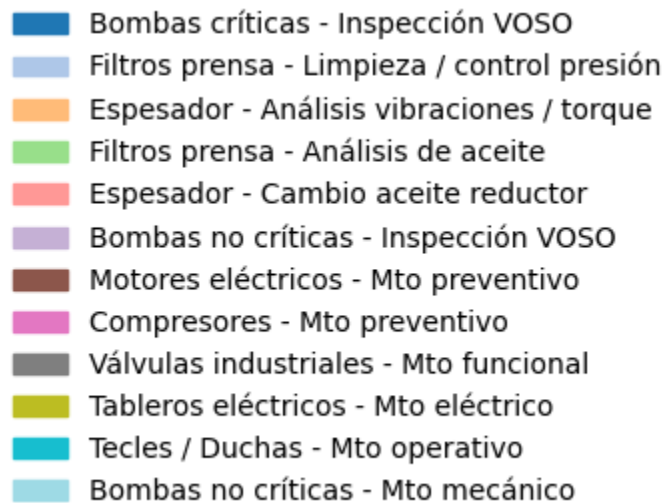


Figura 6. Leyenda de cronograma

Fuente: Creación Propia



Este cronograma constituye una herramienta operativa clave para la gestión del mantenimiento, ya que permite anticipar requerimientos de recursos, programar ventanas de intervención y monitorear el cumplimiento del plan en el corto y mediano plazo. Su integración con el sistema de gestión (CMMS) facilitará la trazabilidad y el ajuste dinámico de las frecuencias en función del comportamiento real observado en operación.

11. Recomendaciones

11.1. Consideraciones para la puesta en marcha

Para que el plan de mantenimiento propuesto sea eficaz y sostenible en el tiempo, debe ser aplicado solo después de un proceso de comisionamiento riguroso y técnicamente documentado. Este comisionamiento debe garantizar que todos los equipos del sistema hayan sido verificados respecto a condiciones de instalación, calibración, alineación, lubricación, señalización y respuesta operacional. Sin este proceso, no se asegura que los equipos estén en condiciones óptimas al iniciar su operación, lo que podría invalidar parte del plan y generar fallas tempranas difíciles de detectar o mitigar posteriormente.

11.2. Implementación inicial del plan de mantenimiento

Una vez finalizado el comisionamiento, se recomienda aplicar el plan bajo una lógica conservadora durante el primer año de operación. Las frecuencias de intervención definidas en esta memoria, si bien fundamentadas, deben validarse y ajustarse conforme se adquieran datos reales sobre comportamiento de los equipos. En esta etapa inicial es fundamental monitorear la efectividad de las tareas calendarizadas, evaluar el grado de respuesta frente a fallas y optimizar las frecuencias en función de la evolución del sistema y del aprendizaje adquirido por el personal técnico.

11.3. Consolidación del rol del inspector VOSO

La formalización del Inspector VOSO como parte estructural del equipo de mantenimiento debe considerarse prioritaria. Este rol aporta una capa sensorial de monitoreo no instrumentado que permite detectar desviaciones antes de que se transformen en fallas funcionales. Para ello, el inspector debe recibir formación específica en metodología VOSO y trabajar con un protocolo

estandarizado de inspección sensitiva, cuyos registros alimenten el sistema CMMS para trazabilidad y análisis de tendencias.

11.4. Revisión dinámica del análisis de criticidad

A medida que la planta comience a operar, se recomienda actualizar periódicamente el análisis de criticidad (CTR) incluyendo datos reales de frecuencia de fallas, tiempos de reparación, costos asociados y consecuencias operacionales. Esta revisión debe formar parte de una política de mejora continua que permita priorizar mejor los recursos, revisar planes de intervención y detectar equipos emergentes cuya criticidad se eleve con el tiempo.

11.5. Vínculos técnicos y trazabilidad digital

Es recomendable mantener una relación técnica constante con los fabricantes de los equipos críticos, de manera de acceder a soporte especializado, piezas de recambio, actualizaciones de software o recomendaciones ante fallas complejas. Asimismo, toda la información de mantenimiento, ajustes y alertas debe ser registrada en el sistema CMMS, lo que permitirá consolidar un historial técnico confiable y auditable. Esta trazabilidad es clave para que el plan propuesto sea dinámico, adaptable y efectivo en el tiempo, conforme evolucione la operación y madurez técnica del sistema.

12. Conclusiones

El desarrollo de esta memoria tuvo como objetivo general diseñar un plan de mantenimiento técnico y estratégicamente planificado para el sistema de tratamiento de relaves con depósito en seco de Polpaico Soluciones S.A., con el fin de asegurar la confiabilidad operativa, la eficiencia técnica y el cumplimiento de metas ambientales en la planta Cerro Blanco. A través de una metodología estructurada, apoyada en herramientas como el análisis de criticidad (CTR), el análisis modal de fallos (AMEF) y el análisis de causa raíz (ACR), se logró construir un modelo de mantenimiento robusto y alineado con los desafíos específicos de una planta en etapa de pre-operación.

Durante el desarrollo del trabajo, se cumplió con cada uno de los objetivos específicos planteados. Se caracterizaron los factores normativos, ambientales y territoriales que motivan la implementación del sistema de filtrado, destacando la escasez hídrica en la comuna de Tiltil y el cierre proyectado del tranque actual. Posteriormente, se aplicó el modelo CTR a un total de 57 equipos, permitiendo identificar 14 activos críticos cuya falla tendría alto impacto operacional, económico o ambiental. Con base en esta priorización, se definieron modos de falla típicos, consecuencias operativas, síntomas observables y estrategias de mantenimiento diferenciadas por equipo, frecuencia y tipo de intervención.

Adicionalmente, se elaboró un cronograma semestral de mantenimiento para equipos críticos y no críticos, diseñado para ser integrado directamente en un sistema CMMS y adaptado bajo un enfoque de mejora continua. Uno de los aportes distintivos del plan fue la incorporación del rol del inspector VOSO, cuya función sensorial se plantea como una capa de detección anticipada complementaria al monitoreo predictivo tradicional. También se consideró la

metodología 5S como soporte organizacional para fomentar orden, disciplina operativa y seguridad en terreno.

Desde una perspectiva metodológica, esta memoria propone un enfoque replicable para sistemas industriales que carecen de historial operativo, combinando datos técnicos, experiencia de ingeniería y herramientas de análisis de confiabilidad. La planificación planteada no solo aborda lo técnico, sino que se articula con las metas estratégicas de Polpaico Soluciones S.A., como lo son la extensión de la vida útil del nuevo sistema de relaves hasta 2050 y el cumplimiento de compromisos medioambientales establecidos en su reporte de sostenibilidad.

En términos académicos, el trabajo permite aplicar y validar conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Civil Industrial, conectando teoría, análisis técnico y realidad empresarial. La combinación de gestión de activos físicos, evaluación de riesgos y planificación de recursos entrega una mirada integral de la función de mantenimiento en contextos industriales complejos.

Cerrando, esta memoria representa un esfuerzo técnico, estratégico y profesional que responde a una necesidad real de la industria cementera chilena. Su implementación permitirá a la empresa operar bajo estándares de confiabilidad, sostenibilidad y eficiencia, fortaleciendo su resiliencia operativa y su vínculo con el entorno territorial. Este trabajo sienta una base sólida para futuras actualizaciones, auditorías o ampliaciones del sistema, y demuestra cómo un enfoque de mantenimiento bien diseñado puede convertirse en un verdadero pilar para la continuidad operacional y el desarrollo responsable de las organizaciones.

13. Anexos

Anexo A

Tabla 42. Factores ponderados para el proceso de jerarquización.

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a gestión de activos, 2015.

Factor	Descripción
FF (escala 1 - 4)	1: Excelente: menos de 0,5 eventos al año.
	2: Bueno: entre 0,5 y 1 eventos al año.
	3: Promedio: entre 1 y 2 eventos al año.
	4: Frecuente: mayor a 2 eventos al año.
IO (escala 1 - 10)	1 - 2: Pérdidas de producción menores al 10%
	3 - 4: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%
	5 - 6: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%
	7 - 9: Pérdidas de producción entre 50% y el 74%
	10: Pérdidas de producción superiores al 75%
FO (escala 1 - 4)	1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños
	2 - 3: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
	4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
CM (escala 1 - 2)	1: Costes de reparación, materiales y mano de obra menores.
	2: Costes de reparación, materiales y mano de obra mayores.
SHA (escala 1 - 8)	1 - 2: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales.
	3 - 5: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afectación a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable). Ej. derrames fáciles de contener.
	6 - 7: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud y/o incidente ambiental de difícil restauración
	8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental muy mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos

Tabla 43. Matriz de criticidad propuesta en el modelo CTR.

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a gestión de activos, 2015.

Consecuencia \ Frecuencia	10	20	30	40	50
4	MC	MC	C	C	C
3	MC	MC	C	C	C
2	NC	MC	C	C	C
1	NC	NC	MC	C	C

Tabla 44. Aplicación del modelo de criticidad semicuantitativo CTR en la planta de tratamiento y depósito de relave.

Fuente: Creación Propia.

N° equipo	Equipo	TAG	Factores Asignados					C	CTR
			FF	IO	FO	CM	SHA		
1	Espesador Relaves	5117-EP-01	1	10	4	2	3	45	45
2	Bombas Espesador Relaves	5117-PP-01	3	5	1	1	3	9	27
3	Bombas Espesador Relaves	5117-PP-02	3	5	1	1	3	9	27
4	Feed Tank Espesador	5117-TK-00	1	10	3	2	3	35	35
5	Estanque Overflow Espesador	5117-TK-01	1	10	3	2	3	35	35
6	Bombas Retorno Agua a Planta	5117-PP-03	3	10	1	1	3	14	42
7	Bombas Retorno Agua a Planta	5117-PP-04	3	10	1	1	3	14	42
8	Bombas Agua Dilución Floculante	5117-PP-05	1	4	1	1	3	8	8
9	Bombas Agua Dilución Floculante	5117-PP-06	1	4	1	1	3	8	8
10	Bombas Agua Proceso Filtrada	5117-PP-19	1	3	1	1	3	7	7
11	Bombas Agua Proceso Filtrada	5117-PP-20	1	3	1	1	3	7	7
12	Agitador Overflow Espesador	5117-AG-01	1	6	4	1	3	28	28
13	Estanques Alimentación Filtro	5117-TK-02	1	7	2	2	3	19	19
14	Estanques Alimentación Filtro	5117-TK-03	1	7	2	2	3	19	19
15	Bombas Alimentación Filtro	5117-PP-07	3	7	1	1	3	11	33
16	Bombas Alimentación Filtro	5117-PP-08	3	7	1	1	3	11	33
17	Bombas Alimentación Filtro	5117-PP-09	3	7	1	1	3	11	33
18	Agitadores Estanques Alimentación Filtro	5117-AG-02	1	5	2	1	3	14	14
19	Agitadores Estanques Alimentación Filtro	5117-AG-03	1	5	2	1	3	14	14
20	Filtros Prensa	5117-FL-01	1	10	4	2	3	45	45
21	Filtros Prensa	5117-FL-02	1	10	4	2	3	45	45

22	Chutes Descarga Filtros de Relaves	5117-CH-01	1	4	1	1	3	8	8
23	Chutes Descarga Filtros de Relaves	5117-CH-02	1	4	1	1	3	8	8
24	Estanque Líquido Lavados	5117-TK-04	1	2	1	2	3	7	7
25	Bombas Líquido Lavados	5117-PP-11	1	2	1	1	3	6	6
26	Bombas Líquido Lavados	5117-PP-12	1	2	1	1	3	6	6
27	Agitador Líquido Lavados	5117-AG-04	1	2	1	1	3	6	6
28	Alimentador Correa Transp. de Relaves	5117-CV-01	1	10	1	2	3	15	15
29	Alimentador Correa Transp. de Relaves	5117-CV-02	1	10	1	2	3	15	15
30	Chute Descarga Correa	5117-CH-03	1	2	1	1	3	6	6
31	Chute Descarga Correa	5117-CH-04	1	2	1	1	3	6	6
32	Correa Transportadora de Relaves	5117-CV-03	1	10	1	2	3	15	15
33	Estanque Agua Proceso Filtrada	5117-TK-05	1	2	1	2	3	7	7
34	Bombas Agua Filtrada para Lavado Tela	5117-PP-13	1	4	3	1	3	16	16
35	Bombas Agua Filtrada para Lavado Tela	5117-PP-14	1	4	3	1	3	16	16
36	Bombas Agua Preparación Floculante	5117-PP-15	3	8	1	1	3	12	36
37	Bombas Agua Preparación Floculante	5117-PP-16	3	8	1	1	3	12	36
38	Bombas Agua Nucleo Filtros	5117-PP-22	3	5	2	1	3	14	42
39	Bombas Agua Nucleo Filtros	5117-PP-23	3	5	2	1	3	14	42
40	Unidad Hidráulica Completa Filtro	5117-HU-01	2	7	2	1	3	18	36
41	Unidad Hidráulica Completa Filtro	5117-HU-02	2	7	2	1	3	18	36



42	Puente Grúa Edificio de Filtrado	5117-CN-01	1	1	2	1	3	6	6
43	Ducha Lava Ojos	5117-DU-01	1	1	1	1	1	3	3
44	Compresor Aire Comprimido	5117-CO-01	1	5	1	1	2	8	8
45	Compresor Aire Comprimido	5117-CO-02	1	5	1	1	2	8	8
46	Compresor Aire Comprimido	5117-CO-03	1	5	1	1	2	8	8
47	Estanque Acumulador de Aire Comprimido	5117-TK-06	1	5	1	2	2	9	9
48	Estanque Acumulador de Aire Comprimido	5117-TK-07	1	5	1	2	2	9	9
49	Secador Aire instrumentación	5117-AD-01	1	5	2	1	2	13	13
50	Planta compacta preparación Flocculante	5117-PF-01	1	5	1	2	3	10	10
51	Piscina emergencia	5117-PO-01	1	1	1	1	3	5	5
52	Bomba Piscina Emergencia	5117-PP-17	2	1	1	1	3	5	10
53	Teclé Eléctrico	5117-CN-02	1	1	1	1	3	5	5
54	Piscina Agua Contactadas	5117-PO-02	1	1	1	1	3	5	5
55	Bomba Agua Contactadas	5117-PP-18	2	1	1	1	3	5	10
56	Filtro Autolimpiante	5117-FL-04	1	1	1	1	3	5	5
57	Bomba Sumidero	5117-PP-21	2	1	1	1	3	5	10

14. Referencias

- 911Metallurgist. (s.f.). *Operación de Tanques Espesadores*. Recuperado el 20 de Junio de 2025, de Manual técnico.: <https://metalurgia.911metallurgist.com/operacion-tanques-espesadores/>
- Agora Soluciones. (s.f.). *Sobre nosotros*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2024, de <https://www.agorasolspa.com/sobre-nosotros/>
- Aguirre Tinitana, J. O. (Marzo de 2019). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para equipos industriales*. Obtenido de <https://repositorio.uti.edu.ec//handle/123456789/1155>
- Atlassian. (s.f.). *Gestión de incidentes para equipos de alta velocidad*. Recuperado el 17 de Febrero de 2025, de Gestión de incidentes KPI Métricas Habituales: <https://www.atlassian.com/es/incident-management/kpis/common-metrics>
- Autemi. (s.f.). *EL GRUPO HIDRÁULICO DEL FILTRO PRENSA*. Recuperado el 16 de Junio de 2025, de <https://www.autemi.com/el-grupo-hidraulico-del-filtro-prensa/?lang=es>
- Balachandran, J. (s.f.). *Vibration Analysis: CMMS User's Guide for Predictive Maintenance*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de Computerized Maintenance Management System: <https://www.maintwiz.com/blog/vibration-analysis-cmms-users-guide-for-predictive-maintenance>
- Bernal, L. (Marzo de 2021). *Most common problems in thickener operations*. Recuperado el 20 de Junio de 2025, de https://aschile.cl/wp-content/uploads/2021/03/articulo-2-problemas-en-espesadores_ingles.pdf

Business Research Insights. (30 de Septiembre de 2024). *Tamaño del mercado de cemento y agregados, participación, crecimiento y análisis de la industria por tipo (agregado, cemento) por aplicación (uso residencial, uso comercial, uso de infraestructura, uso industrial), pronóstico regional hasta 2032*. Obtenido de Business Research Insights: <https://www.businessresearchinsights.com/es/market-reports/cement-and-aggregate-market-104383>

Cadel, S. (13 de Septiembre de 2023). *Principales factores que afectan la lubricación de rodamientos*. Obtenido de Castrol Argentina: <https://ingenierialiquida.castrolargentina.com.ar/castrol/principales-factores-que-afectan-la-lubricacion-de-rodamientos>

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (22 de Febrero de 2024). *Informe Nacional del Sector de la Construcción*. Obtenido de https://www.cmic.org.mx/ceesco/Paginas/2024/Documentos_Nacionales/Informe%20Nacional%20del%20Sector%20de%20la%20Construcción%2004-03-2024.pdf

Ceballos Solano, D. A., & Parra, C. (Enero de 2021). *Aplicación de sistemas de monitoreo remoto para mejorar la disponibilidad de sistemas de levantamiento artificial de crudo*. doi:10.13140/RG.2.2.30832.58881

Chang Parrales, M. F. (18 de Abril de 2019). *Elaboración de un modelo de auditoría para evaluar la gestión de mantenimiento de activos físicos en base a normativa internacional aplicado al caso de estudio: Unión Cementera Nacional (UCEM) planta Chimborazo*. Obtenido de <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/11472>

Claight Corporation. (s.f.). *Mercado de Cemento de América Latina, Informe 2024-2032.*

Recuperado el 20 de Octubre de 2024, de Informes de expertos:

<https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-cemento-de-america-latina>

Claight Corporation. (s.f.). *Mercado de la Construcción en Chile – Por Tipo de Construcción*

(Nueva Construcción, Renovación); Por Uso Final (Comercial, Residencial, Industrial, Institucional); Dinámica del Mercado (2024-2032) y Panorama Competitivo. Recuperado

el 20 de Octubre de 2024, de Informes de Expertos:

<https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-la-construccion-en-chile>

Cruz, E. d. (23 de Mayo de 2025). *Inspección sensitiva de rutina en mantenimiento.* Recuperado

el 9 de Julio de 2025, de Gestion del Mantenimiento:

<https://traction.com/es/blog/inspeccion-sensitiva-de-rutina-estrategias-para-optimizar-tu-mantenimiento>

CRYOSPAIN. (7 de Marzo de 2022). *Mantenimiento de bombas centrífugas: consejos para*

realizarlo de forma preventiva. Obtenido de Consejos:

<https://cryospain.com/es/mantenimiento-bombas-centrifugas-consejos>

Donoso, D. (24 de Febrero de 2024). *Colombiana Argos celebra: cerró 2023 con resultados*

históricos tras su fusión con Summit en EEUU. Obtenido de DFSUD:

<https://dfsud.com/colombia/colombiana-argos-esta-celebrando-cerro-2023-con-maximos-historicos-y>

Dynamox. (12 de Mayo de 2023). *Inspección Sensitiva como aliado del mantenimiento.*

Recuperado el 9 de Julio de 2025, de Blog: <https://dynamox.net/es/blog/inspeccion-sensitiva-como-aliado-del-mantenimiento>

- Dynamox. (21 de Junio de 2024). *Espesadores: conoce los modelos más comunes y las principales fallas*. Recuperado el 20 de Junio de 2025, de Blog: <https://dynamox.net/es/blog/espesadores-conoce-los-modelos-mas-comunes-y-las-principales-fallas>
- Dynapro Pumps. (30 de agosto de 2023). *Cavitación Prevención y Solución*. Recuperado el 26 de Junio de 2025, de Dynapro Pumps: <https://dynaproco.com/technical-support-resources/cavitacion-en-bombas-centrifugas-prevencion-y-soluciones>
- Enrique, D. (9 de Julio de 2025). *Mantenimiento de Espesadores de Relaves*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/presentation/461508158/MANTENIMIENTO-DE-ESPESADORES-DE-RELAVES>
- Filtronic. (Noviembre de 2009). *Manual de Instalacion, Operacion y Mantenimiento de Filtro Prensa*. Recuperado el 16 de Junio de 2025, de Scribd: <https://es.scribd.com/doc/164762486/Manual-de-operacion-de-filtro-prensa>
- Garibian, E. (s.f.). *How CMMS Saves Money: Maintenance ROI Explained*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de CMMS Software: <https://llumin.com/how-cmms-saves-money-llu/>
- Geohidráulica. (s.f.). *Los principales problemas de las bombas centrifugas en minería*. Recuperado el 26 de Junio de 2025, de Geohidráulica: <https://geohidraulica.com/los-principales-problemas-de-las-bombas-centrifugas-en-mineria/>
- Goncalves, T. (13 de Octubre de 2023). *20 benefits of a CMMS*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de Blog: <https://fixsoftware.com/blog/15-benefits-of-a-cmms/>

Hall, J. (21 de Enero de 2025). *Key Factors for Determining Inspection Frequency*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de ACOEM: <https://acoem.us/blog/other-topics/key-factors-for-determining-inspection-frequency/>

Helix2010. (25 de Noviembre de 2015). *informe presenta un análisis de confiabilidad de 8 bombas de extracción de lodos en el Área 600*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de Informe Confiabilidad Bombas: <https://es.scribd.com/document/441918013/Informe-Confiabilidad-Bombas>

ICR Newsroom. (28 de Marzo de 2024). *Cemento Polpaico reports CLP4722.8m loss in 2023*. Obtenido de Cemnet: <https://www.cemnet.com/News/story/176692/cemento-polpaico-reports-clp4722-8m-loss-in-2023.html>

Industrias Dolz. (24 de Agosto de 2023). *Las 5 causas principales de fallo de la correa de accesorios*. Recuperado el 15 de Junio de 2025, de Blog Técnico Dolz: <https://www.idolz.com/las-5-causas-principales-de-fallo-de-la-correa-de-accesorios/>

Intecpros. (Mayo de 2012). *Aplicaciones BLACOH*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de <https://intecpros.cl/PDF/blacoh/Aplicaciones%20BLACOH.pdf>

Interflon. (13 de Noviembre de 2024). *10 errores de lubricación que causan las principales averías*. Recuperado el 27 de Junio de 2025, de Blog de Interflon: <https://interflon.com/es/news/errores-lubricacion-averias>

Jmark Systems. (s.f.). *All You Need to Know About Filter Press Maintenance*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de Blog: <https://www.jmarksystems.com/blog/all-you-need-to-know-about-filter-press-maintenance>

JXSC. (22 de Noviembre de 2022). *Descubra las soluciones a los problemas habituales de los espesadores*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de Blog: <https://www.minejxsc.com/es/blog/uncover-the-solutions-to-common-thickener-problems/#>

JXSC Mining. (14 de Julio de 2022). *FAQ Guías De Filtro Prensa: Filtración, Mantenimiento y Solución de Problemas*. Recuperado el 16 de Junio de 2025, de Noticias: <https://www.jxscmachine.com/es/nuevo/guias-de-preguntas-frecuentes-filtro-prensa-filtracion-mantenimiento-resolucion-de-problemas/#>

JXSC Mining. (25 de Noviembre de 2022). *Uncover The Solutions To Common Thickener Problems*. Recuperado el 20 de Junio de 2025, de Equipment Info: <https://www.minejxsc.com/blog/uncover-the-solutions-to-common-thickener-problems/>

Kaizen Institute Global. (20 de Septiembre de 2023). *Mantenimiento planificado: excelencia en la gestión de equipos*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2024, de <https://kaizen.com/es/insights-es/mantenimiento-planificado/#:~:text=El%20mantenimiento%20planificado%20es%20un,la%20gesti%20de%20los%20equipos>.

Kehuan Pumps. (10 de Agosto de 2022). *Cómo fallan los rodamientos, los acoplamientos y los sellos, y cómo repararlos*. Recuperado el 10 de Junio de 2025, de Noticias de la Industria: <https://es.kehuanpumps.com/news/how-bearings-couplings-and-seals-failand-how-to-fix-them>

Marrero, R., Vilalta, J., García, V., & Iznaga, A. (Mayo de 2023). *Monografía de gestión de la planificación del*. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/370969898_Monografia_de_gestion_de_la_planificacion_del_proceso_de_mantenimiento_Autor

Medina Valdivia, C. E. (Septiembre de 2021). *Evaluación de la efectividad de un plan de seguridad y su relación con la gestión de mantenimiento*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12867/4411>

Melón S.A. (16 de Abril de 2024). *Reporte integrado 2023*. Obtenido de <https://www.melon.cl/wp-content/uploads/2024/04/Reporte-Integrado-Melón-240416.pdf>

Mendoza, J. (s.f.). *Análisis Voso*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de El Análisis Voso: <https://es.scribd.com/document/454998503/ANALISIS-VOSO#:~:text=fallas%20inminentes%20en%20máquinas%20y,para%20identificar%20posibles%20fallas%20y>

MEX. (9 de Octubre de 2024). *How CMMS Saves Money in the Long Run*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de MEX Blog Article: <https://www.mex.com.au/Blog/Article/how-cmms-saves-money-in-the-long-run>

Micronics. (s.f.). *Soluciones de gestión de residuos*. Recuperado el 16 de Junio de 2025, de <https://www.micronicsinc.com/es/filtration-news/tailings-management-solutions/>

Minería Chilena. (29 de Noviembre de 2021). *Cemento Polpaico trabaja en lograr la continuidad operacional de su Complejo Cerro Blanco*. Obtenido de <https://www.mch.cl/negocios-industria/cemento-polpaico-trabaja-en-lograr-la-continuidad-operacional-de-su-complejo-cerro-blanco/>

Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia. (9 de Marzo de 1994). Ley 19300. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

Ministerio de Minería. (11 de Abril de 2007). Decreto 248. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=259901>

Ministerio de Obras Públicas. (16 de Febrero de 2024). Decreto 251. *Diario Oficial de la Republica de Chile*. Obtenido de <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2024/02/16/43778/01/2453594.pdf>

Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2 ed.). (Elsevier, Ed.) Butterworth Heinemann. Recuperado el 1 de Julio de 2025

Neira, F. (20 de Octubre de 2024). Comunicación personal sobre diseño técnico de planta de tratamiento de aguas y relaves.

Nodal. (17 de Septiembre de 2024). *Industria petrolera en Brasil vive una nueva era de crecimiento*. Obtenido de <https://www.nodal.am/2024/09/industria-petrolera-en-brasil-vive-una-nueva-era-de-crecimiento/>

Núñez, V. (2013). *Análisis de la calidad de energía en la Planta Cerro Blanco de cemento Polpaico S. A.* Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115524>

Parra Márquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2015). *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos*. Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Mantenimiento.

Polpaico Soluciones S.A. (1 de Abril de 2024). *Memoria Anual Integrada 2023*. Obtenido de <https://www.polpaicosoluciones.cl/wp-content/uploads/2024/04/Memoria-Integrada-2023.pdf>

Polpaico Soluciones S.A. (s.f.). *Gestión de residuos*. Recuperado el 20 de Octubre de 2024, de <https://www.polpaico.cl/gestion-de-residuos/>

Polpaico Soluciones S.A. (s.f.). *¿Cómo se hace el cemento?* Recuperado el 19 de Octubre de 2024, de <https://www.polpaico.cl/cementos/como-se-hace-el-cemento/>

Polpaico Soluciones S.A. (2022). *Memoria Integrada 2021*. Las condes, Santiago. Obtenido de <https://www.polpaicosoluciones.cl/wp-content/uploads/2022/04/Memoria-Integrada-Polpaico-BSA-2021.pdf>

PSG. (04 de Mayo de 2022). *Centrifugal Pump Troubleshooting Guide*. Recuperado el 26 de Junio de 2025, de GRISWOLD: <https://www.psgdover.com/griswold/centrifugal-pump-minute/article/centrifugal-pump-minute/2022/05/04/centrifugal-pump-troubleshooting-guide#:~:text=nicked%2C%20it%20can%20cause%20leakage,If%20Excessive%20Power%20Is%20Required>

Queirel, A. (Julio de 2023). *Responsabilidad Social Corporativa: Un Análisis en la Industria Cementera*. Valladolid. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/62857/TFM-E-228.pdf?sequence=1>

Rhosonics. (21 de Noviembre de 2022). *Estrategias de control para espesadores*. Recuperado el 20 de Junio de 2025, de Blog: <https://rhosonics.com/es/insight/blog/estrategias-de-control-para-espesadores/>

Rivas, F. (24 de Noviembre de 2024). Comunicación personal sobre condiciones operativas y frecuencia de fallas esperadas.

Rosales, J. (8 de Agosto de 2023). *La importancia de las rutas de inspección en el mantenimiento.*

Obtenido de <https://www.fractal.com/es/blog/para-que-sirven-las-rutas-de-inspeccion#:~:text=El%20propósito%20principal%20de%20una,y%20los%20costos%20de%20mantenimiento>

Rowland, J. (1 de Septiembre de 2023). *ISSUES IN SLURRY PUMP MAINTENANCE*. Recuperado

el 26 de Junio de 2025, de North American Mining Magazine: <https://northamericanmining.com/index.php/2023/09/01/issues-in-slurry-pump-maintenance/>

Roxia. (27 de Marzo de 2025). *Problemas comunes de un filtro prensa*. Recuperado el 16 de Junio

de 2025, de Artículos: <https://roxia.com/es/problemas-comunes-de-un-filtro-prensa/>

ServiceChannel. (19 de Junio de 2025). *Benefits of CMMS*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de

Learn how CMMS benefits your facility by reducing costs, enhancing efficiency, and ensuring compliance. Explore the value of CMMS for optimal performance.: <https://servicechannel.com/blog/how-cmms-benefits-your-facilities/>

Simonson, S. L. (28 de Junio de 2023). *Síntomas de Fallo de los Rodamientos*. Recuperado el 20

de Junio de 2025, de Tameson – Centro de Información Técnica.: <https://tameson.es/pages/sintomas-de-fallo-de-los-rodamientos>

Smith, M. (11 de Julio de 2024). *Most common problems in Thickener operations (Part 1)*.

Recuperado el 20 de Junio de 2025, de PLA proces analysers: <https://www.plapl.com.au/post/most-common-problems-in-thickener-operations>

Tecnofluidos del Golfo SA de CV. (7 de Julio de 2025). *¿Con qué frecuencia realizas mantenimiento preventivo a tus equipos industriales?* Recuperado el 9 de Julio de 2025, de

Linkedin: [https://www.linkedin.com/posts/tecnofluidos-del-golfo-sadecv_mantenimientopreventivo-industria-ingenieraeda-activity-](https://www.linkedin.com/posts/tecnofluidos-del-golfo-sadecv_mantenimientopreventivo-industria-ingenieraeda-activity-7348043177615859712-9_Mr/?utm_source=share&utm_medium=member_android&rcm=ACoAAAxQW2wB0fedjfaylNoztJHvV4obXy2GKuA)

[7348043177615859712-](https://www.linkedin.com/posts/tecnofluidos-del-golfo-sadecv_mantenimientopreventivo-industria-ingenieraeda-activity-7348043177615859712-9_Mr/?utm_source=share&utm_medium=member_android&rcm=ACoAAAxQW2wB0fedjfaylNoztJHvV4obXy2GKuA)

[9_Mr/?utm_source=share&utm_medium=member_android&rcm=ACoAAAxQW2wB0fedjfaylNoztJHvV4obXy2GKuA](https://www.linkedin.com/posts/tecnofluidos-del-golfo-sadecv_mantenimientopreventivo-industria-ingenieraeda-activity-7348043177615859712-9_Mr/?utm_source=share&utm_medium=member_android&rcm=ACoAAAxQW2wB0fedjfaylNoztJHvV4obXy2GKuA)

Valmet. (13 de Noviembre de 2018). *Hydraulic power unit troubleshooting - symptoms, causes and fixes*. Recuperado el 16 de Junio de 2025, de Up and Running:

<https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/reliability/RTHPUTrouble/>

Vedan, A. (28 de Abril de 2025). *Bombas Hidráulicas y sus Principales Fallas*. Recuperado el 10 de Junio de 2025, de Mantenimiento de Equipos Industriales:

<https://traction.com/es/blog/bombas-hidraulicas-y-sus-principales-fallas>

Vier, P. (28 de Abril de 2023). *¿En qué consiste el orden y limpieza en el trabajo industrial?*

Recuperado el 9 de Julio de 2025, de Cold Jet: [https://blog-mx.coldjet.com/orden-y-limpieza-en-el-trabajo-](https://blog-mx.coldjet.com/orden-y-limpieza-en-el-trabajo-industrial#:~:text=Son%20fundamentales%20para%20la%20seguridad,y%20prevención%20de%20accidentes)

[industrial#:~:text=Son%20fundamentales%20para%20la%20seguridad,y%20prevención%20de%20accidentes](https://blog-mx.coldjet.com/orden-y-limpieza-en-el-trabajo-industrial#:~:text=Son%20fundamentales%20para%20la%20seguridad,y%20prevención%20de%20accidentes)

Waldron, R. (22 de Septiembre de 2020). *Centrifugal Pump Maintenance*. Recuperado el 9 de Julio de 2025, de HVAC, Preventative Maintenance:

<https://www.rasmech.com/blog/centrifugal-pump-maintenance/>



Woking. (s.f.). *Solución de problemas para filtro prensa*. Recuperado el 17 de Junio de 2025, de

Blog: <https://wokinget.com/es/blog/troubleshooting-for-filter-press/>