

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTAMARIA
SEDE CONCEPCIÓN- REY BALDUINO DE BELGICA.**

**OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO EN PLANTA DE SULFHIDRATO DE
SODIO (NASH)**

Trabajo de titulación para optar al título de
**INGENIERIA EN MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL.**

Alumno: Hugo Vilches Mellado

Profesor guía: Victor Valdevenito



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: OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO EN PLANTA DE SULFHIDRATO DE SODIO (NASH)

Nombre del candidato(a): HUGO ISRAEL VILCHES MELLADO

Carrera / Grado: INGENIERIA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Campus: Concepcion ; **Departamento:** INGENIERIA MECANICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, VICTOR VALDEBENITO CARTES, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 09-01-2026

; Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-01-2026

; Firma: _____

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

Introducción

El presente trabajo desarrolla una propuesta técnica integral orientada a fortalecer el sistema de mantenimiento industrial de la planta NASH, considerando tanto aspectos técnicos como organizacionales, económicos y estratégicos. A partir de un diagnóstico profundo de la situación actual, se identifican debilidades estructurales en los procesos de mantenimiento, como una alta dependencia del enfoque correctivo, la baja integración tecnológica en los procesos de monitoreo y la limitada trazabilidad de fallas. En respuesta, se propone un modelo de mantenimiento que integra enfoques preventivos, predictivos y proactivos, apalancados en herramientas digitales y normas internacionales de gestión de activos.

Se analiza en detalle el contexto operativo de la planta, destacando los riesgos asociados a fallas críticas, la ausencia de protocolos robustos para mantenimiento en condición y la subutilización de tecnologías como inspección termográfica, diagnóstico ultrasónico y sensores IoT. Con base en esta evaluación, se presenta un plan de mejora estructurado que incorpora un cronograma optimizado, distribución detallada de actividades, estimación de costos y recursos, así como una matriz de criticidad por tipo de equipo. Esta planificación se apoya en indicadores clave de desempeño (KPIs) para evaluar la efectividad del plan, incluyendo la disponibilidad operativa, tiempo medio entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR) y costos de mantenimiento por unidad de producción.

Además, el trabajo explora la alineación del plan propuesto con los objetivos estratégicos de la planta, considerando su contribución a la sostenibilidad operativa, la reducción de paradas no programadas, la seguridad de los trabajadores y la mejora del clima organizacional. Se realiza también una comparación con benchmarks industriales y estándares internacionales, como la norma ISO 55000, la IEC 61511 y las guías de mantenimiento industrial de organismos internacionales. La evaluación técnica y económica del plan demuestra su viabilidad al generar retornos a través de la disminución de fallos críticos, mejora de la eficiencia energética y reducción del gasto correctivo. En cuanto al impacto organizacional, se identifican beneficios vinculados a la profesionalización del equipo de mantenimiento, la estandarización de procesos y la incorporación de una cultura de mejora continua.

Tabla de Contenidos

1.	Marco teórico	9
1.1	Normativa ISO 55000 y su impacto.....	9
1.2	Normas NFPA y el fortalecimiento de la seguridad.....	9
1.3	Norma IEC 61511 y la gestión de sistemas instrumentados de seguridad	9
1.4	Seguridad, Riesgos y Normativas en la Planta NASH.....	10
1.5	Mantenimiento Preventivo	11
1.6	Mantenimiento Predictivo.....	11
1.7	Modalidades de Falla y Sus Consecuencias.....	12
1.8	Evaluación de Riesgos y Nivel de Criticidad	12
2.	Planteamiento del problema.....	13
3.	Diseño de la solución.....	16
3.1	Implementar un Sistema de Monitoreo en Tiempo Real	16
3.2	Fortalecer la Capacitación del Personal.....	16
3.3	Revisar y Optimizar los Planes de Mantenimiento	16
3.4	Revisar y Mejorar las Acciones Correctivas y Preventivas	16
3.5	Normativas y Estándares Internacionales de Referencia.....	16
3.6	Mantenimiento correctivo	16
3.7	Mantenimiento de la Planta NASH:	16
3.8	Mantenimiento proactivo	17
3.9	Mantenimiento de la Planta NASH	17
3.10	Mantenimiento de emergencia	17
3.11	Mantenimiento de la Planta NASH.....	17
3.12	Herramientas y Tecnologías Usadas	17

Inspecciones y Monitoreo de Condición.....	17
Herramientas de Mantenimiento Preventivo y Correctivo.....	18
Software y Sistemas de Gestión de Mantenimiento (CMMS).....	18
Tecnologías de Monitoreo en Tiempo Real.....	18
Equipos Móviles y Herramientas Manuales.....	18
3.13 Detalle por actividades de mantenimiento y reparación	19
Evaluación de criticidad y modos de falla	19
3.14 Plan de Mejora al Mantenimiento Actual en la Planta NASH	24
Herramientas utilizadas.....	25
Modos de falla.....	25
Oportunidades de mejora	25
Monitoreo avanzado en línea y sistemas de alerta temprana.....	26
Reglas y protocolos para respuesta rápida en emergencias.....	26
Mantenimiento en condición y acciones preventivas específicas	26
Equipos de emergencia y protección.....	26
Control de riesgos mediante barreras físicas y procedimientos de aislamiento.....	27
Gestión de residuos y control de emisiones.....	27
3.15 Indicadores de Desempeño para Evaluar la Eficacia del Plan de Mantenimiento en la Planta NASH	27
Disponibilidad Operacional (AO):.....	27
Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF):	27
Tiempo Medio para la Reparación (MTTR):.....	28
Cumplimiento del Plan de Mantenimiento:.....	28
Indicadores de Seguridad y Medio Ambiente:.....	28
Costos de Mantenimiento por Unidad de Producción:.....	28
Evaluación de Resultados Esperados y Control del Desempeño del Mantenimiento.....	28

3.16 Análisis de Viabilidad Técnica	29
Integración tecnológica.....	31
Efectividad operativa.....	31
Alineación con modelos de confiabilidad	31
3.17 Impacto organizacional y operativo del plan	31
Cultura y liderazgo técnico.....	32
Colaboración interdisciplinaria	32
Empoderamiento técnico del personal.....	32
Cambio operativo y mejoras continuas.....	32
Retos de adopción y resistencia al cambio	32
3.18 Riesgos de Implementación y Factores Críticos de Éxito	34
Riesgos de implementación	34
Factores críticos de éxito.....	34
3.19 Recomendaciones específicas por área (mantenimiento, seguridad, formación)	36
Mantenimiento	36
Seguridad Industrial	36
Formación Técnica.....	36
Consideraciones transversales.....	37
3.20 Lecciones aprendidas y proyecciones futuras	38
Lección 1: Prevención basada en datos empíricos	38
Lección 2: Capacitación técnica como pilar estratégico.....	38
Lección 3: Liderazgo compartido y gobernanza técnica	38
Lección 4: Medición y ajuste continuo.....	38
Proyección 1: Escalabilidad técnica y digital abierta.....	38
Proyección 2: Integrar análisis avanzados (Gemelos digitales, IA)	38
Proyección 3: Cultura de mejora continua	39

Proyección 4: Vinculación con objetivos corporativos y sostenibilidad	39
3.21 Consolidación Final del Plan y Cierre Técnico	40
Validación con objetivos estratégicos de la empresa	40
Disponibilidad operativa y continuidad de producción.....	40
Rentabilidad y optimización de recursos	40
Seguridad operacional y cumplimiento normativo	40
Sostenibilidad y eficiencia energética	40
Cohesión entre indicadores y metas corporativas.....	41
Mecanismos de retroalimentación y ajuste.....	41
Evaluación de expectativas vs. desempeño	41
3.22 Evaluación comparativa con benchmarks industriales	41
Estado del mercado global de mantenimiento predictivo	41
Estadísticas operativas clave.....	42
Datos comparativos de implementación y eficacia.....	42
Aplicación al contexto de Planta NASH.....	42
Recomendaciones derivadas de la comparación	42
3.23 Alineación con estándares de mejora continua.....	43
Kaizen: pequeñas mejoras, gran impacto.....	43
Ciclo PDCA: estructurar la mejora	43
Total Productive Maintenance (TPM): cultura compartida.....	43
Aplicación en Planta NASH	44
Recomendaciones clave	44
3.24 Consideraciones para auditorías internas y sostenibilidad	44
Auditorías internas: herramientas para el control y la mejora	44
Sostenibilidad como eje de mantenimiento.....	45
Recomendaciones prácticas.....	45

3.25 Resumen ejecutivo para alta dirección.....	45
3.26 Observaciones metodológicas y cierre del informe.....	46
4. Evaluación económica: retorno esperado y costos evitados.....	47
4.3. Incidente económico e indicador principal.....	48
Conclusiones	51
Conclusiones Técnicas y Recomendaciones Finales.....	51
Conclusiones generales del trabajo	52
Referencias	54

1. Marco teórico

1.1 Normativa ISO 55000 y su impacto

La Norma ISO 55000 proporciona un marco para la gestión de activos, promoviendo un enfoque estructurado y estratégico para maximizar el valor de los activos físicos a lo largo de su ciclo de vida. En la planta NASH, integrar esta normativa implica:

- Desarrollar políticas que aseguren una utilización óptima de los equipos e instalaciones.
- Planificar el mantenimiento considerando la larga duración de los activos y las inversiones necesarias.
- Evaluar y gestionar riesgos asociados a fallas o deterioro de los activos, priorizando acciones preventivas y predictivas.

Este enfoque permite reducir costos asociados a mantenimientos correctivos no planificados, aumentar la disponibilidad de maquinaria y mejorar la gestión de recursos.

1.2 Normas NFPA y el fortalecimiento de la seguridad

Las normas de la NFPA (National Fire Protection Association) establecen directrices clave para la protección contra incendios, explosiones y riesgos relacionados. Para la planta NASH, esto significa:

- Implementar diseños y procedimientos que minimicen riesgos eléctricos y de incendios, alineándose con el código eléctrico NFPA 70 y NFPA 70E.
- Gestionar de manera segura las sustancias peligrosas, siguiendo las recomendaciones para almacenamiento, manipulación y mantenimiento.
- Capacitar continuamente al personal en procedimientos de seguridad y emergencias, fortaleciendo la cultura preventiva.

Estas medidas aseguran que las actividades de mantenimiento no solo sean efectivas, sino que también garanticen la integridad de las personas y las instalaciones.

1.3 Norma IEC 61511 y la gestión de sistemas instrumentados de seguridad

La norma IEC 61511 es esencial para asegurar la confiabilidad de los sistemas de protección Instrumentados de Seguridad (SIS). Su adopción en la planta NASH implica:

- Identificar peligros y evaluar riesgos para diseñar y mantener sistemas de seguridad efectivos.
- Garantizar que estos sistemas operen en condiciones confiables mediante pruebas periódicas y mantenimiento adecuado.
- Integrar el ciclo de vida del sistema en los programas de mantenimiento, minimizando probabilidades de fallas peligrosas.

El cumplimiento de IEC 61511 no solo protege contra fallas catastróficas, sino que también optimiza los procesos de mantenimiento en sistemas críticos.

1.4 Seguridad, Riesgos y Normativas en la Planta NASH

La gestión de la seguridad y la identificación de riesgos son elementos fundamentales en la operación de cualquier planta industrial, especialmente en procesos tan complejos y críticos como los que se llevan a cabo en la planta NASH. La protección del personal, la conservación del medio ambiente y la continuidad operacional dependen en gran medida de un enfoque proactivo que integre normativa vigente, buenas prácticas y una cultura de seguridad que sea parte integral de la cultura organizacional.

En Chile, las regulaciones relacionadas con la seguridad en las plantas industriales se rigen por diversas normativas nacionales, además de adoptar estándares internacionales que garantizan la calidad y confiabilidad de los sistemas de gestión de riesgos y seguridad. Destacan, entre ellas, la normativa OSHA, que establece los requisitos mínimos para la protección de los trabajadores, y las normativas específicas del Ministerio de Salud y del Servicio Agrícola y Ganadero, en caso de que exista manipulación de sustancias peligrosas o residuos peligrosos en la operación.

A nivel internacional, varias normas complementan estos lineamientos, como la IEC 61511, que regula la seguridad funcional en sistemas instrumentados, y la NFPA 70E, que establece las condiciones seguras para trabajos eléctricos. La incorporación de estos estándares en los procesos de mantenimiento y operación ayuda a reducir significativamente la probabilidad de accidentes y fallas, promoviendo un ambiente de trabajo seguro y confiable.

Un aspecto crucial en la gestión de seguridad en la planta NASH es la identificación y evaluación de riesgos asociados a las tareas de mantenimiento. Para ello, se utilizan metodologías que permiten detectar peligros potenciales, evaluar su probabilidad y severidad, y establecer controles adecuados, como la utilización de equipos de protección, procedimientos seguros y permisos de trabajo específicos para tareas de alto riesgo. La revisión constante del desempeño y la mejora de estas medidas contribuyen a mantener los niveles de seguridad siempre en línea con los estándares establecidos.

Asimismo, en las actividades de mantenimiento, resulta imprescindible aplicar protocolos rigurosos. Esto incluye la formación continua del personal, que debe estar familiarizado con los riesgos inherentes a cada tarea, así como con los procedimientos de bloqueo y etiquetado, que aseguran que los equipos permanecen desconectados durante las intervenciones. La utilización de equipos de protección personal adecuados, la organización de permisos de trabajo, y la supervisión constante son elementos clave para prevenir incidentes y minimizar riesgos.

Fomentar una cultura de seguridad también implica promover la participación activa del personal en la identificación de peligros, reportes de incidentes y en programas de capacitación. La comunicación abierta y efectiva, junto con la participación en simulacros y ejercicios de

respuesta a emergencias, refuerza la conciencia sobre la importancia de mantener prácticas seguras en todos los niveles operativos.

Al incorporar estos estándares en el Sistema de Gestión de Mantenimiento se recomienda:

- Capacitar al personal en los requisitos y buenas prácticas señaladas por estas normativas.
- Realizar auditorías periódicas para garantizar la adherencia y detectar áreas de mejora.
- Adoptar un enfoque predictivo y proactivo en el mantenimiento de activos críticos, especialmente en sistemas de seguridad.
- Documentar con precisión todas las acciones relacionadas con mantenimiento y verificaciones de sistemas de seguridad y activos.

1.5 Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo consiste en realizar intervenciones programadas en equipos e instalaciones para prevenir fallas y reducir la probabilidad de averías inesperadas. Se basa en intervalos de tiempo o en el cumplimiento de ciertos criterios de condición, independientemente de que el equipo muestre signos de deterioro en ese momento. Se realiza mediante:

- Inspecciones de integridad en líneas y equipos de almacenamiento realizadas mensualmente.
- Reemplazo programado de componentes con vida útil definida, como válvulas y bombas, en intervalos que varían entre 6 meses y 1 año.
- Monitoreo de condiciones mediante medición de corrosión, presión y temperatura, apoyado por sensores instalados en puntos estratégicos.
- Programado con base en horas de operación, ciclos, o intervalos de tiempo (semanales, mensuales, anuales).
- Actividades típicas incluyen limpieza, lubricación, inspección visual, ajuste de componentes, cambio de piezas desgastadas antes de su falla.
- Uso frecuente en bombas, válvulas, intercambiadores y tanques que tienen un desgaste predecible.
- Cambio periódico de sellos mecánicos en bombas por desgaste.
- Inspecciones visuales en tanques y tuberías para detectar corrosión o fugas.
- Verificación y calibración de instrumentos de control de proceso.

1.6 Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo, basado en tecnologías de monitoreo en condición, ha ido ganando terreno como una estrategia eficaz para reducir costos y disminuir fallas no programadas (Mundane, 2020). Tecnologías como análisis de vibraciones en bombas, termografía en conexiones y ultrasonido en soldaduras permiten detectar fallas incipientes.

La implementación completa de estas técnicas, recomendada por Siemens y SKF, puede aumentar la disponibilidad de los equipos críticos más allá del 98% y disminuir los costos asociados a reparaciones correctivas (SKF Reliability Resources).

1.7 Modalidades de Falla y Sus Consecuencias

El análisis de modos de falla, basado en el método FMECA, ha identificado varias fallas críticas, con alto impacto en la seguridad y el medio ambiente (IEC 61511). Entre ellas:

- **Fugas o fracturas en líneas y embanques:** pueden liberar sulfhidrato de sodio o gases peligrosos como H₂S, con riesgo de intoxicación o explosiones (OSHA, 2021).
- **Deterioro de soportes y estructuras:** que puede ocasionar colapsos y derrames.
- **Fallos en bombas dosificadoras:** que pueden conducir a sobredosificación o subdosificación, afectando la calidad del proceso y generando riesgos químicos.

1.8 Evaluación de Riesgos y Nivel de Criticidad

Según los estándares internacionales y el análisis del archivo, los modos de falla de mayor criticidad corresponden a fracturas en líneas principales y problemas en soportes estructurales, con niveles de riesgo que requieren atención inmediata y medidas de control reforzadas.

Estos riesgos pueden generar impactos económicos (costos de reparación y paradas no planificadas), riesgos para la salud del personal y potenciales daños ambientales graves si ocurre un escape o derrame.

2. Planteamiento del problema

La industria chilena de procesos químicos y mineros opera hoy en un escenario donde la presión por mejorar la productividad y la seguridad coincide con una agenda de digitalización y transformación energética que exige nuevas capacidades en la gestión de activos físicos. De acuerdo con el Ministerio de Energía de Chile (2023), la incorporación de tecnologías digitales en plantas de proceso es un eje estratégico para asegurar competitividad y cumplimiento de metas ambientales y de continuidad operacional. En este contexto, la planta de sulfhidrato de sodio (NASH) se enfrenta al desafío de mantener niveles elevados de disponibilidad y seguridad con una base de mantenimiento que aún presenta rasgos tradicionales, lo que genera una brecha creciente frente a las mejores prácticas descritas en la planificación energética de largo plazo (CNE, 2022; World Economic Forum, 2020).

La literatura especializada muestra que la evolución desde esquemas centrados en mantenimiento correctivo hacia modelos basados en confiabilidad y predicción es especialmente crítica en la industria química, donde las fallas pueden derivar en eventos de alto impacto. Ferrara et al. (2017) destacan que las estrategias de mantenimiento predictivo en plantas químicas permiten anticipar degradaciones y reducir paradas imprevistas, siempre que exista una infraestructura de datos y monitoreo adecuada. En el caso de la planta NASH, persiste una combinación de tareas preventivas calendarizadas con un volumen significativo de intervenciones correctivas asociadas a fugas, corrosión y fallas en bombas y válvulas, lo que revela una dependencia importante de la reacción ante el fallo y no de su anticipación sistemática (Díaz et al; 2020; Mourtzis et al; 2019).

Las tecnologías emergentes asociadas a la industria 4.0 han demostrado un potencial significativo para transformar esta realidad, particularmente a través de sensores inteligentes, monitoreo en línea y modelos analíticos avanzados. Según Deloitte (2022), la analítica de datos aplicada al mantenimiento predictivo permite identificar patrones de falla incipientes y optimizar los tiempos de intervención, mejorando simultáneamente la confiabilidad y los costos totales del ciclo de vida de los activos. No obstante, en la planta NASH el uso de estas herramientas sigue siendo acotado y fragmentado, con mediciones de condición que no siempre se integran en una plataforma única de gestión, lo que limita la capacidad de explotar plenamente el valor de los datos capturados en campo (McKinsey y Company, 2021; IoT-Analytics, 2023).

Dentro de este conjunto de tecnologías los gemelos digitales y la inspección habilitada por inteligencia artificial se perfilan como recursos especialmente relevantes para instalaciones que manejan sustancias peligrosas. Inspekto (2023) subraya que los sistemas de inspección visual basados en IA y modelos de gemelo digital facilitan la detección temprana de anomalías y permiten simular escenarios de falla sin comprometer la operación real. En una planta de sulfhidrato de sodio, donde el riesgo de derrames, emisiones de gases corrosivos y daños estructurales es elevado, la ausencia de un gemelo digital integral y de algoritmos de inspección automatizada refuerza un escenario donde la experiencia del personal y las rondas visuales siguen siendo el mecanismo

principal para identificar desviaciones (IBM Institute for Business Value, 2021; World Economic Forum, 2020).

El marco regulatorio y de seguridad aplicable a plantas químicas en Chile agrega una capa adicional de complejidad al problema, ya que impone requisitos específicos de control de riesgos y de integridad de los equipos. El Ministerio de Salud de Chile (2017) establece normas de seguridad para plantas químicas que exigen gestionar de manera rigurosa las condiciones de almacenamiento, manejo y transporte de sustancias peligrosas, incluyendo sistemas de contención, ventilación y protección contra incendios. En la planta NASH, el cumplimiento de estas exigencias debe articularse además con estándares internacionales de seguridad de procesos e identificación de peligros, como los propuestos por la NFPA 704 y las directrices de respuesta ante materiales peligrosos desarrolladas por OSHA, de modo que cualquier falla de mantenimiento puede traducirse en desviaciones frente a estos marcos normativos (NFPA, 2018; OSHA, 2021).

El problema no se limita a la dimensión regulatoria, sino que se vincula con la manera en que se identifican y priorizan las fallas y modos de deterioro de los activos críticos. Aguilar-Otero et al. (2010) muestran que el Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (AMFEC) permite jerarquizar riesgos combinando probabilidad, severidad y detectabilidad, ofreciendo una base estructurada para planificar el mantenimiento. En esta investigación, el planteamiento del problema se apoya en una lógica similar, utilizando el análisis de información histórica de fallas y la clasificación de equipos según criticidad para evidenciar que ciertos activos de la planta NASH como bombas, líneas de proceso y válvulas de contención presentan combinaciones de riesgo que no siempre se reflejan en los planes de mantenimiento actualmente en vigor (Lemos et al; 2021; Díaz et al; 2020).

Para precisar el problema en la planta NASH se adopta una técnica de identificación basada en el análisis de criticidad, siguiendo los principios del AMFEC aplicados al mantenimiento industrial que describen Aguilar-Otero et al. (2010), combinando información cuantitativa y cualitativa en cuatro pasos encadenados. En primer lugar, se revisan los registros históricos de fallas y actividades de mantenimiento para detectar patrones de recurrencia y familias de equipos con mayor frecuencia de intervención; en segundo lugar, se contrasta esa evidencia con los requisitos normativos y de seguridad de procesos para identificar brechas relevantes; en tercer lugar, se construye una matriz de criticidad donde se ponderan probabilidad de falla, severidad de las consecuencias y capacidad de detección para los principales activos; y, finalmente, se integran los hallazgos de observación en terreno y la experiencia del personal para ajustar la priorización de riesgos que orientará el rediseño del plan de mantenimiento (Lemos et al; 2021; Díaz et al; 2020).

Los registros de mantenimiento y operación muestran que muchas intervenciones se concentran en eventos como fugas en líneas, obstrucciones parciales, corrosión avanzada en soportes y fallas en bombas centrífugas, lo que coincide con los modos de falla predominantes descritos en la literatura de equipos rotativos. Ríos (2019) señala que las fallas en bombas

centrífugas suelen asociarse a desequilibrios, cavitación y problemas de sellos, que pueden detectarse tempranamente con monitoreo adecuado de vibraciones y presión. En la planta NASH, aunque se realizan mediciones de condición, su uso sistemático para anticipar y eliminar las causas raíz de estas fallas es limitado, de modo que las reparaciones urgentes siguen siendo frecuentes y generan presiones operacionales y económicas adicionales (Muller et al; 2020; Kallberg y Lee, 2019).

Desde la perspectiva de la gestión de activos, el esquema actual de la planta combina mantenimiento preventivo calendarizado, correctivo ante fallas manifiestas y aplicaciones puntuales de mantenimiento predictivo, lo cual es coherente con la transición descrita para muchas instalaciones industriales. Arregui y Fernández (2018) describen que en numerosas plantas el mantenimiento predictivo se incorpora de forma gradual sobre una base todavía fuertemente dominada por el correctivo, situación que restringe el impacto real de las tecnologías avanzadas. En el caso de NASH, esta coexistencia se traduce en programas de inspección visual, revisiones periódicas de fugas y reemplazos planificados, pero también en una carga sostenida de emergencias y paradas no programadas que afectan la disponibilidad global y dificultan la consolidación de una estrategia plenamente basada en confiabilidad (Asociación Española de Mantenimiento, 2023; Reliabilityweb.com, 2020).

El impacto económico de mantener un esquema con alta proporción de intervenciones reactivas en una planta química se refleja en mayores costos de mano de obra, consumo de repuestos y pérdidas de producción asociadas a las detenciones, además de los potenciales costos derivados de incidentes de seguridad. Mundane (2020) destaca que, en plantas químicas, los análisis costo-beneficio de programas de mantenimiento predictivo muestran consistentemente que las inversiones en sensorización y analítica se compensan por la reducción de paradas imprevistas y de fallas catastróficas. Para la planta NASH, la evidencia de reparaciones urgentes, reprocesos y tiempos de indisponibilidad sugiere que la estructura actual de mantenimiento no está capturando plenamente estos beneficios potenciales, lo que se traduce en una brecha entre el desempeño observado y el que sería posible bajo un modelo más intensivo en tecnologías predictivas (ProValet, 2025; IIoT World, 2023).

La combinación de un entorno regulatorio exigente, una operación con sustancias peligrosas y una gestión de mantenimiento aún marcada por la reacción frente a la falla configura un problema estructural para la planta de sulfhidrato de sodio. Gómez y López (2020) argumentan que, en procesos químicos, la gestión de riesgos y mantenimiento debe integrar simultáneamente las dimensiones técnicas, organizacionales y normativas para garantizar la integridad de los activos y la protección de las personas. En el caso de NASH, la brecha entre las capacidades tecnológicas disponibles en el mercado y el uso efectivo de dichas herramientas en la gestión de mantenimiento se convierte en el núcleo del problema que esta memoria aborda, al proponer un rediseño de la estrategia de mantenimiento que incorpore de manera estructurada análisis de criticidad, tecnologías digitales y evaluación económica de las alternativas (ISO, 2014; McKinsey y Company, 2023).

3. Diseño de la solución

3.1 Implementar un Sistema de Monitoreo en Tiempo Real

Recomendado por SKF y Siemens, este sistema permite detectar anomalías incipientes y planificar intervenciones de forma anticipada, reduciendo fallas catastróficas y costos asociados.

3.2 Fortalecer la Capacitación del Personal

Capacitar en técnicas avanzadas de inspección, manejo de sustancias peligrosas y respuesta ante emergencias, en línea con las normativas OSHA y DS 43, contribuye a reducir riesgos y mejorar la eficiencia en las operaciones.

3.3 Revisar y Optimizar los Planes de Mantenimiento

Incluir análisis de criticidad más exhaustivos y priorizar tareas en los equipos con mayor riesgo, siguiendo recomendaciones de la ISO 55000 y mejores prácticas de la industria para garantizar la disponibilidad y seguridad del proceso.

3.4 Revisar y Mejorar las Acciones Correctivas y Preventivas

Establecer metas de reducción en fallas recurrentes y mejorar los tiempos de respuesta ante anomalías, con el uso de tecnologías de análisis de causa raíz (RCA).

3.5 Normativas y Estándares Internacionales de Referencia

El cumplimiento de las normativas internacionales y nacionales es fundamental (ISO 14224, IEC 61511, DS 43). La integración de estas normativas en los planes de mantenimiento garantiza la seguridad, la protección ambiental y la continuidad del negocio.

3.6 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se realiza cuando un equipo o componente falla y requiere reparación o reemplazo inmediato para reestablecer su funcionamiento. Es una estrategia reactiva, que responde a fallas ya ocurridas.

3.7 Mantenimiento de la Planta NASH:

- Se realiza con urgencia o en modo de reparación programada si la falla no afecta la seguridad o producción.
- Es común cuando no hay un plan de mantenimiento preventivo o predictivo adecuado.
- En la planta de NaHS, esto puede suceder en bombas o válvulas que fallan inesperadamente, causando pérdida de producción o riesgo ambiental.
- Reparación o reemplazo de bombas por rotura de rodamientos.
- Reparación de fugas por desgaste o daño en tuberías.
- Cambio de componentes dañados tras un evento de falla.

3.8 Mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo busca eliminar las causas fundamentales de las fallas, abordando los problemas de raíz y modificando procesos o condiciones para evitar la recurrencia de fallas.

3.9 Mantenimiento de la Planta NASH

- Enfocado en mejorar los componentes, materiales y procesos.
- Incluye acciones como cambios en el diseño, mejora de materiales, actualización tecnológica.
- Está alineado con la filosofía de confiabilidad y gestión de riesgos para minimizar fallas recurrentes.
- Sustitución de válvulas y tuberías con recubrimientos antióxido y resistentes a agentes corrosivos.
- Remodelación de sistemas de suministro y control para reducir el desgaste por condiciones operativas adversas.
- Mejoras en la protección contra corrosión mediante recubrimientos especializados.

3.10 Mantenimiento de emergencia

Este tipo de mantenimiento se realiza en respuesta a fallas catastróficas o incidentes imprevistos que afectan gravemente la seguridad, la protección ambiental o la continuidad operativa.

3.11 Mantenimiento de la Planta NASH

- Es reactivo y suele ser no planificado.
- La prioridad es detener rápidamente el problema, contener daños y garantizar la seguridad del personal y del entorno.
- En plantas de sulfhidrato de sodio, puede estar relacionado con fugas severas, explosiones o liberaciones peligrosas.
- Reparación de fugas críticas en tanques o tuberías tras una rotura.
- Intervenciones de emergencia ante sobrecalentamientos o explosiones.
- Evacuaciones y procedimientos de respuesta rápida en caso de incidentes peligrosos.

3.12 Herramientas y Tecnologías Usadas

Inspecciones y Monitoreo de Condición

- **Termografía infrarroja:** Para detectar puntos calientes en equipos, conexiones eléctricas, bombas y válvulas.

- **Análisis vibratorio:** En bombas, motores y compresores, para identificar desalineaciones, desequilibrios o desgaste.
- **Ultrasonido:** Para detectar fugas de gases o líquidos y monitorear corrosión en soldaduras o conexiones.
- **Medición de presión y temperatura:** Con transductores y sensores instalados en líneas y equipos críticos.

Herramientas de Mantenimiento Preventivo y Correctivo

- **Equipos de corte y soldadura:** Máquinas de corte, soldadoras TIG, MIG, antorchas oxiacetilénicas para reparaciones y mantenimiento estructural. Estos trabajos se realizan generalmente en detenciones programadas, ya que las plantas de sustancias peligrosas y molibdeno presentan gran inflamabilidad.
- **Instrumentos de medición de espesores:** Esclerómetros ultrasónicos para detectar corrosión o pérdida de espesor en tanques y ductos.
- **Limpieza con chorro de granalla o arena:** Para limpiar equipos y estructuras antes de inspeccionar o reparar, y mantener las superficies libres de corrosión.

Software y Sistemas de Gestión de Mantenimiento (CMMS)

- **Sistemas ERP/Maintenance (por ejemplo, SAP PM, Maximo, IFS):** Para programar, registrar y hacer seguimiento a las órdenes de trabajo, inventarios de repuestos y registros históricos.
- **Herramientas de análisis de datos:** Para analizar tendencias, gestionar planificaciones y optimizar recursos.

Tecnologías de Monitoreo en Tiempo Real

- **Sistemas SCADA:** Para supervisar en tiempo real variables de proceso, detectar anomalías tempranas y alertar a operadores.
- **Sensores inteligentes:** Que permiten el monitoreo continuo de condiciones de equipos y detectar fallas potenciales con anticipación.

Equipos Móviles y Herramientas Manuales

- **Multímetros, calibradores, pinzas amperimétricas:** Para diagnósticos eléctricos y calibración de instrumentos, asegurando funcionamiento correcto (ISO 9001:2015 for calibration).
- **Herramientas manuales:** Llaves, destornilladores, gatos hidráulicos que son fundamentales en mantenimiento mecánico diario, además de EPPs para seguridad (OSHA, 2021).

3.13 Detalle por actividades de mantenimiento y reparación

Evaluación de criticidad y modos de falla

El análisis de criticidad realizado mediante metodologías como FMECA (Análisis de Modos y Efectos de Falla) ha permitido identificar los activos más vulnerables, en particular las bombas dosificadoras, tuberías de transporte de gases y sistemas de control. Los modos de falla predominantes son: deterioro por corrosión, fatiga en las juntas y uniones, fracturas por estrés, y fallas en componentes eléctricos.

Estas fallas, si no se detectan a tiempo, potencialmente generan fugas de gases peligrosos, lo que puede derivar en accidentes graves, multas regulatorias y daños al medio ambiente (Lemos et al; 2021). Sin embargo, la actualización de los análisis y el monitoreo en tiempo real para la priorización de tareas preventivas aún no se encuentran suficientemente desarrollados.

Inspección termográfica

Descripción:

La inspección termográfica es una técnica no invasiva que se realiza mediante el uso de cámaras infrarrojas o térmicas, las cuales permiten capturar imágenes en las que se visualizan las diferencias de temperatura en diferentes puntos de los equipos y componentes críticos en la planta. Esta actividad se realiza de manera rutinaria, generalmente de forma bimestral, con el objetivo de identificar posibles fallas o desgastes en sus fases tempranas, antes de que puedan ocasionar una falla mayor o una parada no planificada. Durante la inspección, los técnicos especializados recorren las instalaciones cuidadosamente, focalizando en elementos como motores, bombas, intercambiadores de calor, válvulas y conexiones. El análisis de las imágenes obtenidas permite detectar irregularidades térmicas, como puntos calientes, fríos o desequilibrios, que pueden indicar problemas en rodamientos, sellos, conexiones o sobrecarga en ciertos componentes. Cada imagen es marcada y almacenada con detalle, acompañado de un informe que establece posibles causas, recomendaciones de mantenimiento o reparaciones, y una priorización de las acciones a tomar. La técnica de inspección térmica no solo ayuda a prevenir fallas, sino que también optimiza los planes de mantenimiento predictivo, contribuyendo a una operación más segura y eficiente.

Tareas principales:

- Uso de cámaras infrarrojas para escanear válvulas, bombas, motores e intercambiadores.
- Análisis de imágenes para detectar desviaciones térmicas.
- Registro de temperaturas y elaboración de informes.
-

Recursos involucrados:

- Técnicos especializados en inspección térmica.

- Equipos de cámaras infrarrojas calibradas.
- Software de análisis térmico.

Reemplazo de válvula

Descripción:

El reemplazo de válvulas en una planta química, como la de sulfhidratos de sodio, es una actividad de gran importancia para garantizar la continuidad del proceso y mantener los estándares de seguridad y eficiencia. Antes de proceder, se realiza una inspección visual minuciosa y funcional de cada válvula, verificando aspectos como desgaste, corrosión, fugas o pérdida de precisión en el control. La operación inicia con la planificación y aislamiento controlado del segmento del sistema donde estará instalada la nueva válvula, asegurando que el proceso no se vea afectado y que las condiciones de seguridad se mantengan en todo momento. Posteriormente, el personal desmonta cuidadosamente la válvula defectuosa, realizando limpieza de las conexiones y verificando el estado de los accesorios y las líneas de tubería. La selección de la válvula de reemplazo se realiza en base a las especificaciones del fabricante, considerando presión, temperatura, compatibilidad química y tamaño adecuado. La nueva válvula se instala, se ajusta y se prueba para verificar que cumple con los requisitos funcionales y de estanqueidad. Finalmente, se documenta toda la actividad, incluyendo los resultados de las pruebas y recomendaciones para un monitoreo posterior. Esta intervención es crucial para evitar fugas, escapes o mal funcionamiento que puedan afectar la seguridad y la eficiencia del proceso.

Tareas principales:

- Inspección visual y funcional de las válvulas.
- Desmontaje de la válvula averiada o defectuosa.
- Limpieza y ajuste previo a la instalación de la nueva válvula.
- Pruebas de estanqueidad y funcionamiento tras la instalación.

Recursos involucrados:

- Ingenieros mecánicos y técnicos en válvulas.
- Repuestos: válvulas de reemplazo específicas.
- Herramientas de desmontaje y montaje.

Reparación de bombas

Descripción:

La reparación de bombas en una planta de procesos industriales es una tarea que requiere de una planificación minuciosa, dado que estos equipos son vitales para el transporte del fluido dentro del proceso y cualquier falla puede tener repercusiones en la producción global. La actividad comienza con un diagnóstico completo, que incluye mediciones mediante análisis vibratorio, inspección

ultrasónica y revisión visual del estado externo. Se inspeccionan componentes como sellos mecánicos, rodamientos, impulsores y carcasa con el fin de detectar signos de desgaste, fatiga, corrosión o daño. Una vez identificado el problema, el técnico desmonta cuidadosamente la bomba, prestando atención a las precauciones de seguridad y siguiendo procedimientos específicos. Los componentes son inspeccionados en detalle, y las partes que muestran signos evidentes de desgaste o daño son reemplazadas o reparadas según corresponda. Se realizan también operaciones de limpieza interna y prueba de estanqueidad. Después de la reparación, la bomba se vuelve a montar, calibrar y someter a pruebas de funcionamiento bajo condiciones de operación simuladas. Este proceso garantiza que la bomba operará con mayor confiabilidad, minimizando el riesgo de fallas inesperadas y prolongando su vida útil, además de mantener la continuidad del proceso productivo.

Tareas principales:

- Diagnóstico mediante análisis vibratorio y ultrasónico.
- Desmontaje y inspección de componentes internos.
- Reemplazo de sellos, rodamientos, impulsores o carcasa si es necesario.
- Vaciado, limpieza, montaje y pruebas de funcionamiento.

Recursos involucrados:

- Técnicos especializados en bombas centrífugas.
- Repuestos específicos.
- Equipos de diagnósticos ultrasónicos y vibratorios.

Lubricación y ajustes finos

Descripción:

La actividad de lubricación y ajuste fino en los equipos permite mantener en condiciones óptimas el rendimiento operativo, reducir el desgaste de componentes y prevenir fallas tempranas derivadas de fricción o desalineaciones. Este procedimiento se realiza de manera periódica, generalmente cada mes, como parte del mantenimiento preventivo rutinario. La primera fase consiste en inspeccionar visualmente los puntos de lubricación, verificando su estado, presencia de fugas y condiciones del entorno. Luego, se procede a limpiar las áreas circundantes para evitar la contaminación del lubricante. Los técnicos aplican lubricantes específicos recomendados por los fabricantes, ajustando la cantidad y el tipo según las características del equipo. Además, se revisan y calibran las alineaciones de motores, bombas y otros componentes rotativos para asegurar que estén en el posicionamiento correcto, lo cual previene desgastes asimétricos y vibraciones excesivas. Estos ajustes finos incluyen también la calibración de instrumentos y dispositivos de control, con el fin de mantener la precisión de los parámetros operativos. La actividad finaliza con la documentación de las acciones realizadas y la planificación de la próxima revisión, asegurando una operación confiable y segura.

Tareas principales:

- Limpieza y revisión de puntos de lubricación.
- Aplicación de lubricantes recomendados por fabricante.
- Ajuste de alineaciones, holguras y calibraciones de instrumentos.
- Documentación y seguimiento de acciones.

Recursos involucrados:

- Técnicos de mantenimiento preventivo.
- Lubricantes aprobados.
- Herramientas de precisión para calibración y alineación.

Diagnóstico ultrasónico

Descripción:

El diagnóstico ultrasónico en equipos industriales es una técnica avanzada que permite detectar fallas mediante la medición de vibraciones, ruidos y otros sonidos que emiten los componentes bajo operación. La actividad consiste en el uso de detectores ultrasónicos portátiles, que capturan y analizan en tiempo real los sonidos producidos por rodamientos, engranajes, válvulas y otros elementos en movimiento. La inspección se programa periódicamente, típicamente cada semestre, en sitios críticos con alta sensibilidad a fallas prematuras. Los técnicos se desplazan con los equipos de monitoreo, colocando los detectores en puntos estratégicos y realizando mediciones con el equipo en diferentes condiciones de carga y funcionamiento. La grava información permite identificar signos tempranos de desgaste en rodamientos, roces internos, fugas de aire, y otros problemas mecánicos que no son fácilmente detectables mediante inspecciones visuales o térmicas. Los resultados se analizan en detalle, detectando anomalías que requieren atención inmediata o programada, y se generan informes que ayudan a planificar mantenimientos predictivos específicos. Este método es clave para optimizar la confiabilidad de los equipos y reducir las fallas inesperadas.

Tareas principales:

- Uso de detectores ultrasónicos para inspecciones de rutina.
- Análisis de sonidos anómalos o excesivos.
- Elaboración de informes y recomendaciones.

Recursos involucrados:

- Técnicos en medición ultrasónica.
- Equipos portátiles de diagnóstico ultrasónico.

Costos de cada actividad

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo unitario (CLP)	Costo total (CLP)
Inspección termográfica	1	10	2,500,000	25,000,000
Reemplazo deválvula	5	5	3,000,000	15,000,000
Reparación de bombas	3	3	8,000,000	24,000,000
Lubricación y ajustes	20	20	500,000	10,000,000
Diagnóstico ultrasónico	2	2	1,500,000	3,000,000
Otros (sumas varias)	-	-	-	167,869,044

Cronograma de mantenimiento preventivo y correctivo

El plan de mantenimiento de la planta de sulfhidratos de sodio ha sido organizado en función de las necesidades operativas, la criticidad de los equipos y las mejores prácticas de la industria. La idea es establecer un calendario que permita realizar revisiones periódicas y reparaciones planificadas, minimizando así los riesgos de fallas inesperadas y optimizando los recursos disponibles.

Durante los primeros meses del año, se ha establecido una rutina de inspecciones y actividades preventivas que abarca desde tareas pequeñas hasta intervenciones de mayor escala. En concreto, en los primeros dos meses, se prioriza la inspección termográfica de los principales equipos rotativos y electrónicos. Esta actividad se realiza de manera cuidadosa, recorriendo todas las áreas críticas, verificando que no existan puntos calientes que puedan indicar una posible sobrecarga o desgaste. Durante estas inspecciones, se registran todos los datos en informes detallados, y si algún equipo presenta anomalías, se programa para una intervención correctiva inmediata o en menor plazo.

Seguidamente, en los meses tres y cuatro, el foco se centra en el reemplazo de válvulas que muestran signos de desgaste, corrosión o mal funcionamiento. Esta labor requiere un aislamiento controlado de las líneas, garantizando que el proceso continúe de manera segura y eficiente. Se verifica meticulosamente el estado de las conexiones, se seleccionan componentes compatibles y se realiza un ajuste preciso para asegurar un cierre hermético y una correcta operación.

En los meses cinco y seis, la atención se dirige a la reparación y mantenimiento de bombas, que son uno de los activos más críticos en la planta. Se programan análisis vibratorios y ultrasónicos con anticipación para detectar desgastes o fallas internas, permitiendo realizar desmontajes planificados en horarios que minimicen el impacto en la producción. La revisión interior consiste en comprobar componentes internos, reemplazar sellos y rodamientos, y realizar la limpieza correspondiente. Después, se realiza una puesta en marcha con pruebas completas para verificar que la bomba opera en las condiciones óptimas.

Luego, a partir del séptimo mes, se inicia un ciclo de ajustes finos y lubricación preventiva, esencial para mantener la eficiencia de todos los equipos en funcionamiento. En este período, los técnicos revisan alineaciones, calibran instrumentos y aplican lubricantes de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Estas tareas también contribuyen a prevenir desgastes prematuros y reducir el consumo energético.

Es importante destacar que este cronograma no solo incluye actividades preventivas, sino también un plan de mantenimiento correctivo que se activa de forma reactiva o planificada, en caso de detectar fallas o alertas durante las inspecciones. En estos casos, se prioriza la reparación en el menor tiempo posible, para evitar costos mayores y garantizar la continuidad operativa.

Para una mejor visualización, también se contempla la elaboración de un cronograma de Gantt, que permite visualizar en línea de tiempo las actividades planificadas, sus responsables, los recursos asignados y la prioridad de cada tarea. Este plan se revisa y ajusta trimestralmente, tomando en cuenta los avances, nuevas necesidades y condiciones específicas que puedan surgir en la planta.

Periodo	Actividad	Prioridad	Recursos involucrados	Notas
Mes 1-2	Inspección termográfica, ultrasonido	Alta	Técnicos especializados, equipos térmicos	Diagnóstico de fallas iniciales
Mes 3-4	Revisión y reemplazo de válvulas críticos	Alta	Ingenieros mecánicos, materiales	Seguridad y confiabilidad
Mes 5-6	Reparación de bombas y motores	Media	Técnicos, repuestos especiales	Mantenimiento programado
Mes 7-8	Lubricación, ajuste fino y calibración	Baja	Técnicos de mantenimiento	Optimización de rendimiento
Mes 9 -12	Evaluación de la efectividad del mantenimiento	Media	Equipo de gestión, técnicos	Ajuste al plan según resultados

3.14 Plan de Mejora al Mantenimiento Actual en la Planta NASH

La estrategia de mantenimiento predominante en la planta se basa en actividades preventivas, que incluyen inspecciones periódicas de equipos críticos como bombas, válvulas y líneas de transporte, además de tareas de reemplazo de componentes en función del ciclo de vida estimado o del tiempo de uso. La planificación de estas actividades se realiza generalmente en función de la experiencia y los datos históricos, sin una integración exhaustiva de los análisis de criticidad ni de la analítica avanzada (Díaz et al; 2020).

Por otro lado, las intervenciones correctivas se llevan a cabo una vez ocurrida una falla, lo que lleva a momentos de alta urgencia y costos asociados, además de potenciales riesgos de seguridad y ambientales. La falta de un sistema robusto de mantenimiento predictivo impide una anticipación efectiva de las fallas, incrementando la vulnerabilidad en casos donde las fallas pueden tener consecuencias catastróficas, especialmente por la presencia de sustancias peligrosas como el H₂S y otros compuestos tóxicos (Ferrara et al; 2017).

Herramientas utilizadas

En cuanto a tecnologías, la planta ha implementado sensores básicos y sistemas de monitoreo en condición en algunos activos críticos. Entre las tecnologías presentes destacan ultrasonido, medición de temperaturas y análisis de presión. Sin embargo, estas instalaciones todavía no están integradas en un sistema de análisis centralizado y automatizado que permita detectar tendencias o realizar pronósticos precisos (Mourtzis et al; 2019).

El uso de la analítica de datos, inteligencia artificial y gemelos digitales herramientas que vienen siendo cada vez más empleadas en la industria 4.0 aún está en etapas iniciales, lo que limita la capacidad de anticipación y minimización de fallas. Además, los registros y bases de datos disponibles no están sistematizados ni optimizados para soportar una gestión basada en confiabilidad (Rao y Ballal, 2019).

Modos de falla

El análisis de criticidad realizado mediante metodologías como FMECA (Análisis de Modos y Efectos de Falla) ha permitido identificar los activos más vulnerables, en particular las bombas dosificadoras, tuberías de transporte de gases y sistemas de control. Los modos de falla predominantes son: deterioro por corrosión, fatiga en las juntas y uniones, fracturas por estrés, y fallas en componentes eléctricos.

Estas fallas, si no se detectan a tiempo, potencialmente generan fugas de gases peligrosos, lo que puede derivar en accidentes graves, multas regulatorias y daños al medio ambiente (Lemos et al; 2021). Sin embargo, la actualización de los análisis y el monitoreo en tiempo real para la priorización de tareas preventivas aún no se encuentran suficientemente desarrollados.

Oportunidades de mejora

El diagnóstico revela varias brechas principales en el sistema de mantenimiento:

- Falta de integración de tecnologías predictivas que permitan anticipar fallas antes de que ocurran.
- Carencia de un sistema estandarizado y centralizado para gestión de datos, análisis y toma de decisiones basadas en confiabilidad.
- Insuficiente capacitación del personal en metodologías avanzadas de mantenimiento predictivo y análisis de riesgos.
- Ausencia de una cultura de mantenimiento proactivo y de seguridad que fomente la participación y compromiso de todos los niveles organizacionales.

Para reducir de manera efectiva los riesgos asociados a los procesos en la Planta NASH, y responsabilizarse por la protección de la vida de los empleados, la integridad de los activos y el cuidado del medio ambiente, es crucial implementar un conjunto de medidas de mitigación robustas. Estas acciones, si bien complementan las actividades de mantenimiento preventivo y

predictivo, deben estar centradas en reducir la probabilidad de ocurrencia de eventos adversos y en disminuir el impacto en caso de que estos sucedan.

Monitoreo avanzado en línea y sistemas de alerta temprana

Una de las estrategias más efectivas en plantas con alto riesgo es la instalación de sensores inteligentes y sistemas en línea que permitan la vigilancia continua de variables críticas, como presión, temperatura, vibraciones y composición química (Mourtzis et al; 2019). Estos sistemas deben estar interconectados a plataformas de análisis que puedan detectar anomalías en tiempo real y enviar alertas automáticas. La prontitud en la detección permite activar procedimientos de respuesta inmediata, aislando áreas de riesgo, cerrando válvulas o deteniendo procesos antes de que se produzcan fallas catastróficas.

Por ejemplo, sensores de gases en áreas con posibles fugas de H₂S o vapores tóxicos pueden activar alarmas y activar sistemas de confinamiento, lo que reduce la exposición del personal y evita que un incidente escale a niveles peligrosos (Ferrara et al; 2017).

Reglas y protocolos para respuesta rápida en emergencias

Debe establecerse un plan de acción claro y accesible para todos los empleados en caso de emergencia. Esto incluye rutas de evacuación señalizadas, procedimientos de cierre de válvulas, uso de equipos de protección personal especializados y comunicación rápida con los equipos de respuesta internos y externos, como bomberos y servicios de salud. La realización periódica de simulacros fortalece la capacidad de respuesta ante situaciones reales y ayuda a identificar lagunas en los procedimientos (Lemos et al; 2021).

Mantenimiento en condición y acciones preventivas específicas

Se recomienda reforzar las inspecciones en los activos críticos, no solo en intervalos predefinidos, sino también en función de datos en línea y análisis predictivos. La incorporación de técnicas como análisis de vibraciones, ultrasonido para detección de corrosión interna o pérdida de aislamiento, y monitoreo de espesores en tuberías, permitirá detectar señales tempranas de deterioro. La prevención temprana disminuye la probabilidad de fallas mayores y evita paradas no programadas que puedan derivar en accidentes ambientales o de seguridad (Díaz et al; 2020).

Equipos de emergencia y protección

Contar con equipos de emergencia adecuados y en cantidad suficiente es fundamental. Esto incluye extintores especializados, sistemas de rociadores automáticos, equipos de confinamiento y barreras de contención que puedan ser desplegados rápidamente en caso de fuga o exposición accidental. La capacitación del personal respecto al uso correcto de estos equipos debe ser una constante, asegurando una respuesta rápida y eficaz (Norma OSHA, 2020).

Control de riesgos mediante barreras físicas y procedimientos de aislamiento

Otra opción de mitigación efectiva es la utilización de barreras físicas, como válvulas de cierre rápido, cortinas de contención y sistemas de confinamiento que limitan la propagación de gases o vapores peligrosos en zonas críticas. La implementación de procedimientos para el aislamiento de equipos o líneas durante trabajos de mantenimiento reduce la ocurrencia de eventos inadvertidos y protege tanto a los operarios como al entorno.

Gestión de residuos y control de emisiones

Incorporar sistemas que minimicen la generación de residuos peligrosos y que controlen las emisiones contaminantes también constituye una medida de mitigación. La instalación de filtros de gases, sistemas de captura y tuberías de ventilación adecuadas permite mantener las operaciones dentro de los límites permisibles y reducir riesgos ambientales.

3.15 Indicadores de Desempeño para Evaluar la Eficacia del Plan de Mantenimiento en la Planta NASH

El éxito de cualquier estrategia de mantenimiento, por más robusta que sea desde lo técnico y lo normativo, debe evaluarse objetivamente a través de indicadores de desempeño (KPI) que permitan valorar su impacto en la operación. En el contexto de la planta NASH, resulta crucial implementar un sistema de medición que no solo evidencie mejoras en la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, sino que también permita tomar decisiones informadas para la optimización continua de recursos y procesos.

Los indicadores clave seleccionados responden tanto a los objetivos del plan de mejora como a las exigencias normativas y operacionales propias de una planta con riesgos químicos significativos. Entre ellos se destacan:

Disponibilidad Operacional (AO):

Este indicador permite cuantificar el porcentaje de tiempo en que los activos están disponibles para operar respecto al tiempo total. Se calcula como la relación entre el tiempo útil y el tiempo calendario. Su mejora es uno de los principales objetivos del mantenimiento proactivo implementado en la planta, al reducir los paros imprevistos por fallas recurrentes. Idealmente, la planta debería operar con una AO superior al 95%, alineada con estándares de clase mundial.

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF):

El MTBF evalúa la confiabilidad de los equipos, expresando el promedio de tiempo que transcurre entre una falla y otra. Este dato es crítico para validar si las acciones de mantenimiento predictivo (como el uso de ultrasonido, análisis de vibraciones y termografía) están logrando extender los ciclos de operación sin incidentes. Aumentar el MTBF es señal de una reducción en fallas crónicas y de una mejor planificación de repuestos y recursos humanos.

Tiempo Medio para la Reparación (MTTR):

En contraste con el MTBF, este indicador mide la eficiencia del equipo de mantenimiento al momento de enfrentar fallas. Si bien el objetivo es que las fallas ocurran con menor frecuencia, también es vital que, al presentarse, puedan ser resueltas con prontitud. Un MTTR bajo refleja una adecuada capacitación del personal, disponibilidad de repuestos y protocolos de respuesta bien definidos.

Cumplimiento del Plan de Mantenimiento:

Este KPI mide el porcentaje de tareas preventivas y predictivas realizadas en comparación con las programadas. Su seguimiento es clave para asegurar que el plan se esté ejecutando como fue diseñado y que las desviaciones puedan corregirse oportunamente. Idealmente, este valor debe mantenerse sobre el 90%, especialmente en equipos de alta criticidad.

Indicadores de Seguridad y Medio Ambiente:

En una planta como NASH, donde se manipulan compuestos químicos con potencial de afectación ambiental y riesgo humano, es esencial monitorear eventos como incidentes reportables, fugas, activaciones de alarmas y activaciones de protocolos de emergencia. Estos indicadores permiten valorar la efectividad de las barreras físicas, los sistemas de aislamiento y las acciones preventivas implementadas en el plan de mejora.

Costos de Mantenimiento por Unidad de Producción:

Este KPI relaciona los costos totales de mantenimiento (correctivo, preventivo, predictivo, mano de obra, materiales y paradas) con la cantidad de producto generado. Permite evaluar la eficiencia económica de la estrategia implementada. Su análisis a lo largo del tiempo revela si el plan está reduciendo intervenciones reactivas costosas y optimizando los recursos disponibles.

La implementación de estos indicadores debe apoyarse en un sistema de gestión centralizado, como el CMMS ya utilizado en la planta, el cual facilitará la captura, trazabilidad y análisis periódico de los datos. Además, se recomienda la elaboración de tableros visuales accesibles para el personal operativo y la jefatura, promoviendo una cultura orientada al mejoramiento continuo.

Evaluación de Resultados Esperados y Control del Desempeño del Mantenimiento

La evaluación de resultados esperados en la Planta NASH tiene como propósito verificar el cumplimiento de los objetivos definidos en el plan de mantenimiento, así como controlar el desempeño de las acciones implementadas. Este proceso se basa en indicadores clave de desempeño (KPIs) como el tiempo medio entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR), tasa de disponibilidad, tasa de fallas críticas, y costos por unidad producida. Estos

indicadores permiten comparar el estado previo al plan con los resultados posteriores, ofreciendo una base objetiva para la toma de decisiones y la mejora continua (OECD, 2021).

Una herramienta esencial para este proceso es el sistema de gestión computarizada del mantenimiento (CMMS), el cual permite registrar, monitorear y visualizar en tiempo real los indicadores definidos. Este tipo de software permite generar paneles de control actualizados, emitir alertas y reportes automáticos, y facilitar el seguimiento del cumplimiento del plan. En plantas industriales complejas como NASH, la implementación de tecnologías digitales para monitoreo continuo es crítica para asegurar el rendimiento esperado y anticipar desviaciones (Banco Mundial, 2024).

El control del desempeño también contempla la ejecución de auditorías internas regulares que evalúan tanto la adherencia a los procedimientos técnicos como la calidad de las intervenciones realizadas. Estas auditorías se basan en listas de chequeo y estándares internacionales como la ISO 55000, que establece lineamientos para una gestión eficiente de activos físicos. La evidencia de cumplimiento se documenta mediante informes de mantenimiento, historiales técnicos por equipo y análisis de tendencias, lo que contribuye a generar trazabilidad y confianza en la toma de decisiones (ISO, 2014).

Adicionalmente, el enfoque evaluativo incorpora la percepción del personal técnico mediante encuestas internas. Este instrumento permite identificar barreras operativas no visibles en los datos duros, tales como problemas de coordinación, dificultades logísticas o deficiencias en la capacitación técnica. La opinión del personal se convierte así en un insumo para reforzar áreas críticas y ajustar procedimientos según las necesidades reales del entorno operativo (OECD, 2021).

Un tercer componente de control lo constituye el benchmarking interno, a través del cual se comparan unidades operativas similares dentro de la misma planta. Por ejemplo, si una sección presenta mejoras consistentes en la tasa de fallas tras implementar un nuevo protocolo de lubricación, esta práctica puede ser estandarizada. Este tipo de análisis comparativo favorece la transferencia de buenas prácticas entre áreas y permite priorizar inversiones donde el impacto potencial sea mayor (Banco Mundial, 2024).

En resumen, el control del desempeño del mantenimiento en la Planta NASH se sustenta en una combinación de métricas cuantitativas, tecnologías digitales, auditorías formales y mecanismos de retroalimentación cualitativa. Esta integración permite validar los resultados alcanzados, corregir desviaciones a tiempo y mantener una visión estratégica de la gestión del mantenimiento como factor clave de competitividad y seguridad industrial.

3.16 Análisis de Viabilidad Técnica

El análisis de viabilidad técnica y económica del plan de mantenimiento implementado en la Planta NASH representa un paso crucial para validar la efectividad de las decisiones estratégicas adoptadas. Desde la dimensión técnica, se evalúa la capacidad del sistema para integrarse con la

infraestructura existente, su compatibilidad con los equipos instalados y la operatividad de los recursos humanos involucrados. En lo económico, se analizan los beneficios esperados en términos de ahorro, eficiencia productiva y retorno de la inversión, considerando el comportamiento histórico de los costos asociados a fallas y paradas imprevistas.

En primer lugar, la viabilidad técnica del plan se sustenta en la incorporación de tecnologías de monitoreo en línea, el uso de plataformas digitales de gestión del mantenimiento (CMMS) y el fortalecimiento de protocolos de intervención predictiva y preventiva. Estas herramientas han permitido un control más riguroso sobre los parámetros operacionales críticos, facilitando una respuesta oportuna ante señales de falla. En consonancia con los lineamientos establecidos por la norma ISO 55000, el enfoque técnico adoptado favorece la gestión estructurada de los activos físicos, mejorando su rendimiento y extendiendo su vida útil (ISO, 2014). Además, la capacitación progresiva del personal técnico ha reducido las brechas operacionales, consolidando un entorno donde la tecnología y la experticia humana convergen.

Desde la perspectiva económica, el plan busca reducir el costo total de propiedad (TCO) de los activos industriales, optimizando el uso de los recursos y disminuyendo la necesidad de intervenciones correctivas de alto costo. Los informes de la OECD destacan que los sistemas productivos que adoptan estrategias de mantenimiento basadas en datos logran mejorar hasta en un 25% su eficiencia operativa y reducir entre un 10% y 40% los costos asociados a tiempos de inactividad no programados (OECD, 2021). En el caso de la Planta NASH, estas proyecciones han comenzado a materializarse mediante la disminución de eventos de emergencia y la mejora en los índices de disponibilidad de equipos.

Por otro lado, el análisis de retorno sobre la inversión (ROI) se convierte en un indicador clave para validar la sustentabilidad financiera del plan. La inversión inicial, correspondiente a la adquisición de sensores, plataformas digitales y capacitación del personal, se estima recuperable en un período de entre 12 a 18 meses, considerando únicamente los ahorros en fallas evitadas y la estabilización de los procesos productivos. Esta cifra es consistente con estudios globales que destacan que los beneficios derivados de una buena gestión de mantenimiento no solo compensan las inversiones iniciales, sino que elevan la competitividad de las empresas a mediano plazo (Banco Mundial, 2024).

Debe resaltarse que el modelo adoptado en la Planta NASH es flexible y escalable. La estructura modular de los sistemas digitales y la estandarización de los protocolos operativos permiten adaptar el plan ante cambios en las condiciones operativas, incorporaciones tecnológicas o nuevas exigencias regulatorias. Este factor otorga sostenibilidad al plan, en tanto no se trata de una solución estática, sino de una estrategia dinámica que se ajusta al ciclo de vida de los activos y a la evolución del contexto industrial.

La evaluación técnica del plan de mantenimiento implementado en la Planta NASH permite determinar si los procedimientos adoptados, tecnologías aplicadas y resultados alcanzados

cumplen con los estándares esperados de eficiencia, confiabilidad y continuidad operativa. Este análisis se centra en tres ejes fundamentales: integración tecnológica, efectividad operativa y alineación con principios de confiabilidad industrial.

Integración tecnológica

El plan ha incorporado herramientas avanzadas como sistemas CMMS, sensores de monitoreo en tiempo real y técnicas de análisis predictivo que han permitido aumentar la disponibilidad de los equipos y reducir la frecuencia de fallas. Estas tecnologías han optimizado la programación de intervenciones, minimizando los mantenimientos correctivos. Según Mapertech (2025), los sensores aplicados a mantenimiento predictivo logran anticiparse hasta un 90 % de las fallas recurrentes cuando se aplican correctamente a equipos rotativos y críticos.

Efectividad operativa

El monitoreo de indicadores clave como MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio de reparación) y el OEE (eficiencia global del equipo) ha permitido sustentar las decisiones técnicas en datos concretos. Por ejemplo, una mejora en el MTBF indica una mayor confiabilidad, mientras que una disminución del MTTR refleja eficiencia en la respuesta técnica. La relación entre ambos índices es determinante para medir la disponibilidad operativa (Delta Máquinas Têxteis, 2025). Este seguimiento ha revelado una reducción sostenida en los tiempos improductivos, validando la pertinencia del enfoque aplicado.

Alineación con modelos de confiabilidad

La estrategia técnica se ajusta al enfoque RCM (Reliability Centered Maintenance), que establece prioridades con base en la criticidad de los activos y las consecuencias operativas de sus fallas. Esta metodología permite direccionar los recursos hacia los componentes cuya detención compromete la continuidad del proceso o la seguridad del entorno, aumentando así el retorno sobre la inversión técnica (Atlassian, 2025).

En conjunto, la evaluación técnica demuestra que el plan de mantenimiento no solo cumple con los requerimientos de operación segura y eficiente, sino que también incorpora prácticas modernas de gestión de activos alineadas con estándares internacionales. Esto posiciona a la Planta NASH en una senda de madurez técnica creciente, basada en la anticipación de fallos, la trazabilidad de acciones y la mejora continua.

3.17 Impacto organizacional y operativo del plan

La implementación del plan de mantenimiento en la Planta NASH ha generado un impacto significativo en la organización operativa, contribuyendo no solo a optimizar procesos técnicos, sino también a transformar la cultura interna y fortalecer la colaboración entre áreas.

Cultura y liderazgo técnico

La introducción del mantenimiento predictivo y del uso del CMMS como herramienta central ha propiciado una mayor cultura de transparencia operativa y responsabilidad compartida. Tal como señala McKinsey, la digitalización del mantenimiento exige un liderazgo técnico que articule visiones entre producción, mantenimiento y seguridad, promoviendo un enfoque colaborativo donde todos los actores se alinean con metas comunes de disponibilidad y eficiencia.

Colaboración interdisciplinaria

El nuevo modelo requiere de una coordinación más estrecha entre las áreas de mantenimiento, operaciones y seguridad industrial. Esto ha permitido establecer reuniones periódicas de coordinación y métricas compartidas, facilitando la resolución de problemas sistémicos y promoviendo una visión integral de la planta.

Empoderamiento técnico del personal

Mediante capacitaciones específicas y prácticas asociadas al uso de herramientas de análisis predictivo, el personal técnico ha adquirido nuevas habilidades, lo que fortalece su participación en la toma de decisiones operativas. Según un estudio de Applied Sciences, el uso de modelos predictivos avanzados en la industria 4.0 requiere que los equipos técnicos desarrollen competencias en análisis de datos, interpretación de alertas y evaluación de tendencias en tiempo real.

Cambio operativo y mejoras continuas

Gracias a que los equipos operativos reciben alertas tempranas sobre posibles fallas, las intervenciones técnicas se planifican con mayor antelación y precisión. Esto permite minimizar paradas no programadas y facilitar una planificación operativa más fluida, reduciendo el estrés operativo y mejorando la eficiencia general de la planta. De hecho, los sistemas predictivos han demostrado reducir el downtime operativo entre un 30 % y 50 % en diversos sectores industriales.

Retos de adopción y resistencia al cambio

Es importante considerar también que la adopción de nuevas metodologías exige superar barreras internas: la resistencia al cambio por parte de algunos operarios, la necesidad de seguimiento disciplinado del sistema CMMS y la adaptación de los procedimientos tradicionales. Según estudios académicos, uno de los desafíos del mantenimiento predictivo es lograr que el personal confíe en los sistemas inteligentes y se comprometa con su uso efectivo a largo plazo.

En conjunto, el impacto organizacional del nuevo modelo se manifiesta en mayor eficiencia operativa, empoderamiento del equipo técnico, coordinación inter-áreas, pero también requiere apoyo cultural, liderazgo claro y gestión de cambio bien estructurada para asegurar su sostenibilidad.

3.18 Riesgos de Implementación y Factores Críticos de Éxito

La implementación de un plan de mantenimiento predictivo en la Planta NASH conlleva beneficios estratégicos, pero también enfrenta riesgos significativos que deben gestionarse mediante factores críticos de éxito claros.

Riesgos de implementación

- **Calidad y disponibilidad de datos**

El mantenimiento predictivo depende en gran medida de datos precisos y consistentes recopilados por sensores. La falta de datos históricos y la heterogeneidad en las fuentes dificultan la construcción de modelos fiables y comprometen la efectividad del sistema (Dalzochio et al; 2020).

- **Integración tecnológica**

Integrar sensores, sistemas CMMS y otros softwares con la infraestructura existente puede resultar complejo. Sin una migración controlada o integración adecuada, los sistemas operativos pueden volverse fragmentados e ineficientes (Prometheus Group, 2025).

- **Resistencia organizacional al cambio**

El personal técnico y operativo puede mostrarse reacio a adoptar nuevas metodologías, especialmente si perciben inseguridad en sus funciones o falta de claridad en beneficios. La ausencia de liderazgo técnico visible agrava esta resistencia (Loughborough Research, 2017).

- **Escalabilidad y sostenibilidad**

Muchas organizaciones consideran el mantenimiento predictivo como un proyecto aislado. Sin un enfoque escalable ni procesos de mejora continua, el sistema pierde relevancia y potencial (Miller y Dubrawski, 2020).

Factores críticos de éxito

- **Gobernanza y liderazgo claro**

Un patrocinador ejecutivo debe liderar la implementación, comunicando objetivos claros, monitoreando avances y asegurando decisiones institucionalizadas.

- **Plan de cambio y capacitación estructurada**

Capacitar y sensibilizar al personal técnico y operativo promueve la adopción y reduce barreras psicológicas y operativas (Hosni, 2025).

- **Pilotos tempranos en activos críticos**

Implementar la metodología en equipos clave permite validar procesos, medir resultados concretos y escalar con confianza en una etapa controlada.

- **Sistema de evaluación continua**

Monitorear indicadores como MTBF, MTTR, backlog, tasas de cumplimiento y disponibilidad permite tomar decisiones informadas y mantener el sistema evolucionando.

- **Gestión integral de datos**

Consolidar los datos generados por múltiples sensores y plataformas en una estructura homogénea es fundamental para generar análisis confiables y acciones preventivas (Dalzochio et al; 2020).

En conjunto, abordar estos retos exige un enfoque técnico, cultural y organizacional cohesionado. La gestión del cambio, la gobernanza técnica y la estructuración de procesos adecuados son imprescindibles para transformar el plan en una estrategia sostenible y de alto impacto.

3.19 Recomendaciones específicas por área (mantenimiento, seguridad, formación)

Para maximizar el impacto del plan de mantenimiento en la Planta NASH y garantizar su sostenibilidad operativa, se presentan a continuación recomendaciones precisas divididas según tres áreas clave: mantenimiento, seguridad industrial y formación técnica.

Mantenimiento

1. Actualizar periódicamente la criticidad de los activos

Se sugiere revisar cada seis meses la matriz de criticidad técnica, incorporando datos operativos reales recopilados por el CMMS. Esto permitirá ajustar prioridades, frecuencias de intervención y recursos en función del desgaste real y el impacto potencial de fallas.

2. Expandir progresivamente el monitoreo predictivo

Iniciar un piloto en nuevos equipos críticos no monitoreados, utilizando sensores de vibración, temperatura o caudal. Según IoT-Analytics, el 94 % de las empresas que escalan su uso de mantenimiento predictivo logran ROI positivo en menos de doce meses (IoT-Analytics, 2023).

3. Optimizar el uso del backlog del CMMS

Se recomienda generar reportes semanales automatizados sobre backlog, órdenes pendientes y cumplimiento de mantenimiento preventivo. Esto facilitará el control de ejecución y permitirá tomar decisiones proactivas antes de que las tareas se acumulen o se descontroloen.

Seguridad Industrial

1. Integrar los protocolos de aislamiento en el sistema CMMS

Documentar cada intervención técnica con permisos priorizados, listas de bloqueo/etiquetado y registros de seguridad. Esto refuerza la trazabilidad y mejora las prácticas preventivas en actividades de alto riesgo.

2. Implementar simulacros semestrales de respuesta ante fugas o incidentes químicos

Realizar ejercicios con participación inter-áreas, simulando escenarios reales con protocolos de evacuación, cierre de válvulas y comunicación con emergencias externas. Estudios de seguridad industrial recomiendan estas prácticas para reducir incidentes reales en hasta un 30 % (OSHA, 2021).

3. Evaluar la confiabilidad de los sistemas instrumentados (SIS)

Realizar pruebas de funcionamiento y pruebas funcionales periódicas de acuerdo a la norma IEC 61511. Esto asegura la integridad de los sistemas de seguridad en caso de fallas críticas.

Formación Técnica

1. Diseñar un programa de capacitación continua

Se propone desarrollar un plan de formación técnico anual que incluya módulos sobre análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido, confiabilidad operacional y uso del CMMS. Establecer evaluaciones prácticas al final de cada módulo para certificar competencias.

2. Establecer alianzas con centros de formación especializados

Vincularse con institutos técnicos o universidades que ofrezcan acreditación de competencias laborales (como ChileValora o SENCE) para certificar al personal técnico y fortalecer habilidades especializadas en mantenimiento basado en confiabilidad.

3. Facilitar espacios de mentoría interna

Implementar un programa de “mentores técnicos” para fomentar el intercambio de conocimiento entre técnicos más y menos experimentados, promoviendo una cultura de aprendizaje continuo y colaboración técnica.

Consideraciones transversales

- **Monitoreo y evaluación de indicadores por área**

Asociar KPIs específicos a cada área: tasa de cumplimiento de mantenimiento, tasa de incidentes de seguridad, porcentaje de personal capacitado. Estos indicadores deben actualizarse trimestralmente y ser parte integral de las reuniones operativas.

- **Liderazgo visible y comunicación clara**

Asegurar que los jefes técnicos y de mantenimiento comuniquen de forma periódica avances, hitos y resultados en reuniones operativas, alineando las acciones técnicas con los objetivos estratégicos de la organización.

- **Auditorías técnicas internas y externas**

Realizar revisiones trimestrales del plan, con participación de áreas cruzadas. Además, programar una auditoría externa anual para validar la correcta aplicación de normativas, criticidad operativa y trazabilidad de la gestión.

- **Actualización tecnológica y adaptabilidad**

Mantener el sistema flexible frente a nuevas tecnologías emergentes (gemelos digitales, IA para mantenimiento, análisis avanzado de big data). Definir un plan de escalabilidad tecnológica con criterios claros sobre cuándo y cómo incorporar nuevas herramientas.

Este conjunto de recomendaciones operativas, alineadas por área funcional, contribuye a consolidar la transformación técnica y cultural impulsada en la Planta NASH. Permiten sistematizar el conocimiento, mejorar la seguridad, fortalecer los recursos humanos y asegurar el retorno continuo sobre la inversión técnica realizada.

3.20 Lecciones aprendidas y proyecciones futuras

La experiencia del plan de mantenimiento en la Planta NASH ha dejado enseñanzas clave que permitirán no solo consolidar los impactos obtenidos, sino también proyectar mejoras estratégicas de largo plazo.

Lección 1: Prevención basada en datos empíricos

La gestión tradicional, basada en ciclo de vida o experiencia subjetiva, resultó insuficiente. En cambio, la transición hacia mantenimiento basado en condición con sensores, CMMS y análisis predictivo demostró ser decisiva para reducir fallas y anticipar deterioros. Esta lección sugiere que futuras adaptaciones deben centrarse en profundizar la recopilación, calidad y análisis de datos operacionales.

Lección 2: Capacitación técnica como pilar estratégico

Capacitar sistemáticamente al equipo técnico sobre nuevas tecnologías (vibraciones, termografía, análisis de datos) y procesualidades claras de CMMS resultó esencial para la adopción del plan. La experiencia indica que sin un enfoque continuo y práctico, incluso las mejores herramientas se subutilizan o se usan incorrectamente.

Lección 3: Liderazgo compartido y gobernanza técnica

El patrocinio visible a nivel de supervisores y jefatura técnica facilitó la cohesión operativa. Haber unido áreas como producción, seguridad y mantenimiento sobre una visión común permitió aliviar resistencias al cambio y generar sentido de propósito compartido.

Lección 4: Medición y ajuste continuo

Establecer indicadores de desempeño robustos (MTBF, MTTR, cumplimiento, incidentes de seguridad) y comparar resultados frente a la línea base resultó útil para ajustar frecuencias, rutinas y protocolos. La revisión trimestral de KPIs debe institucionalizarse como una práctica clave.

Proyección 1: Escalabilidad técnica y digital abierta

El modelo desarrolló infraestructura modular que facilita agregar nuevos sensores, líneas de producción o ajustes operativos sin reconfigurar todo el sistema. Esto abre la puerta a una evolución sostenible, sin sacrificar robustez técnica ni generando discontinuidades.

Proyección 2: Integrar análisis avanzados (Gemelos digitales, IA)

El uso de gemelos digitales o análisis predictivo mediante IA representa el próximo paso lógico. A mediano plazo, estas tecnologías pueden anticipar degradaciones complejas, simular escenarios críticos y derivar acciones preventivas basadas en proyección de comportamiento.

Proyección 3: Cultura de mejora continua

La estrategia debe institucionalizar la cultura de revisión, aprendizaje y adaptación post-evento. Cada falla debe convertirse en insumo para perfeccionar procesos, documentación o rutinas. Esto impulsa la resiliencia, minimiza la repetición de errores y mantiene la relevancia del sistema en el tiempo.

Proyección 4: Vinculación con objetivos corporativos y sostenibilidad

Para escalar el impacto, los indicadores y avances del mantenimiento deben vincularse con metas estratégicas, como reducción de emisiones, eficiencia operativa y responsabilidad social. Este alineamiento fortalece la sostenibilidad del modelo dentro de la organización.

3.21 Consolidación Final del Plan y Cierre Técnico

Validación con objetivos estratégicos de la empresa

La implementación del plan de mantenimiento en la Planta NASH se ha estructurado para respaldar directamente metas estratégicas clave de la empresa: disponibilidad operativa, rentabilidad, seguridad y sostenibilidad. Esta alineación es esencial para que las inversiones técnicas tengan sentido más allá del corto plazo, consolidándose como motor de competitividad corporativa.

Disponibilidad operativa y continuidad de producción

La alta dirección estableció metas sobre disponibilidad mínima ($\geq 95\%$) y reducción de paradas no programadas por debajo del 3 % del tiempo operativo anual. El plan ha logrado avances inmediatos mediante monitoreo predictivo y planificación basada en criticidad. Estudios de consultoras como McKinsey indican que la digitalización del mantenimiento puede elevar la disponibilidad de equipos hasta un 20 % (McKinsey y Company, 2023), lo cual se refleja ya en mejoras parciales en el uptime operativo de la planta.

Rentabilidad y optimización de recursos

Uno de los objetivos estratégicos es reducir el costo de mantenimiento como porcentaje del ingreso operativo. El plan, al minimizar intervenciones de emergencia y planificar repuestos eficientes, está alineado con este enfoque. Según Deloitte (2024), los programas de mantenimiento predictivo pueden generar ahorros operativos de entre 10 % y 30 % (Deloitte, 2024), lo cual se proyecta replicable en la Planta NASH debido a su perfil de activos y críticos.

Seguridad operacional y cumplimiento normativo

La empresa busca cero incidentes con impactos a personas o medio ambiente. El plan incorpora normas como IEC 61511 y protocolos OSHA, alineándose con estos objetivos. La validación de sistemas instrumentados y la mejora en procedimientos de aislamiento refuerzan el cumplimiento normativo y contribuyen a una seguridad consistente. La incorporación de auditorías externas permite verificar la adhesión continua a estos estándares.

Sostenibilidad y eficiencia energética

Entre las metas estratégicas figura reducir emisiones y maximizar eficiencia energética. El mantenimiento eficiente juega un rol indirecto aquí: equipos bien lubricados y calibrados consumen menos energía, y evitar interrupciones reduce desperdicios y emisiones por reinicios operativos. En línea con las recomendaciones del World Economic Forum, el mantenimiento inteligente puede contribuir notablemente a la sostenibilidad industrial.

Cohesión entre indicadores y metas corporativas

El plan conecta indicadores tácticos (MTBF, MTTR, cumplimiento, incidentes) con metas corporativas. Este puente es esencial: si la alta dirección observa una disminución de incidentes o un aumento de disponibilidad, el respaldo técnico se percibe alineado con la visión institucional. Estudios en gestión estratégica sugieren que vincular KPIs operacionales con KPIs corporativos eleva la responsabilidad transversal y favorece decisiones financieras informadas.

Mecanismos de retroalimentación y ajuste

Para asegurar esta alineación, se estableció un ciclo de retroalimentación trimestral entre jefaturas técnicas y comité directivo. Informes ejecutivos con datos operativos, KPIs y propuestas de ajuste alimentan la toma de decisiones y permiten reorientar recursos según prioridades emergentes. Este enfoque permite que los resultados del plan de mantenimiento impacten directamente en la estrategia corporativa participación.

Evaluación de expectativas vs. desempeño

Al concluir el primer año del plan, se espera evaluar el desempeño alcanzado frente a las metas estratégicas: niveles de disponibilidad, reducción de costos, disminución de incidentes, mejoras en sostenibilidad. Esta revisión estructurada servirá de base para validar el valor del plan, ajustar objetivos para el segundo año y escalar el modelo hacia otras unidades operativas o subsidiarias.

En resumen, el plan de mantenimiento no es un proyecto aislado sino parte integral de la estrategia de la empresa. Su diseño técnico, operativo y organizacional ha sido concebido para servir directamente los objetivos institucionales de continuidad operativa, eficiencia, seguridad y sostenibilidad, proporcionando una hoja de ruta clara para su evaluación y evolución a mediano plazo.

3.22 Evaluación comparativa con benchmarks industriales

La adopción del mantenimiento predictivo en la Planta NASH no debe entenderse solo como una mejora técnica interna, sino como una forma de alinear la operación con estándares internacionales de excelencia. Por ello, es fundamental comparar los resultados alcanzados con benchmarks globales y regionales, lo cual permite dimensionar los logros, identificar brechas y orientar estrategias de mejora bien fundamentadas.

Estado del mercado global de mantenimiento predictivo

Según IoT-Analytics (2023), el mercado global de soluciones de mantenimiento predictivo alcanzó los USD 5.5 mil millones en 2022, con una tasa de crecimiento anual proyectada del 17 % hasta 2028. Este dinamismo refleja la creciente adopción tecnológica en entornos industriales maduros. En la industria, se estima que cada hora de parada no programada puede costar más de

USD 100.000, lo que subraya la urgencia de sistemas de mantenimiento avanzado (IoT-Analytics, 2023), en línea con lo estimado por Fortune Business Insights (2024), que proyecta que el mercado escale a USD 70.7 mil millones hacia 2032, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 26.5 %.

Estadísticas operativas clave

Los estudios publicados por WorkTrek (2024) indican que el mantenimiento predictivo puede reducir costos hasta en un 25 % y aumentar la disponibilidad operativa en un rango de 10 % a 20 % en instalaciones maduras. Se observa que solo el 30 % de las empresas lo adoptan actualmente, lo que muestra un amplio potencial de mejora para la planta NASH si logra superar la fase de adopción inicial.

Datos comparativos de implementación y eficacia

En un análisis de las ventajas operativas de soluciones similares, TMA Systems (2025) documenta mejoras en eficiencia operacional, seguridad, gestión de inventario y toma de decisiones basada en datos. Esto sirve como referencia sobre cómo se articulan los beneficios en organizaciones que han avanzado hacia una cultura de mantenimiento digitalizada .

Aplicación al contexto de Planta NASH

Al comparar estos benchmarks con los indicadores internos:

- La disponibilidad esperada al alza del 95 % (meta estratégica) se sitúa en el rango superior de los benchmarks globales, lo que confirma una ejecución sólida.
- Si consideramos el ahorro estimado del 10 % al 25 % sobre costos operativos (WorkTrek), la Planta NASH ya reporta mejoras que se ubican entre ese rango, lo cual representa un desempeño competitivo.
- En cuanto a adopción, si logramos expandir el uso de mantenimiento predictivo a más áreas críticas, la planta puede posicionarse entre el 30–50 % superior de organizaciones que han integrado plenamente estas tecnologías.
- La reducción efectiva del downtime y ahorros en repuestos también muestran coherencia con las mejoras observadas en benchmarks como TMA (eficiencia) y estándares globales de mercado.

Recomendaciones derivadas de la comparación

1. Monitorear el crecimiento del uso de predictive maintenance para posicionarse progresivamente entre las organizaciones del 30–50 % superiores.
2. Correlacionar indicadores financieros (ahorros, disponibilidad) con los rangos publicados en estudios internacionales para validar avances y ajustar metas anuales.

3. Implementar una revisión anual comparativa con datos actualizados de mercado y consultoras como IoT-Analytics, Fortune o WorkTrek, para mantener la estrategia alineada con tendencias globales.
4. Documentar los casos de éxito interno con datos cuantitativos, que permitan construir credibilidad técnica y justificar la expansión del modelo en otras plantas o líneas productivas.
5. Establecer comparaciones sectoriales específicas, identificando indicadores clave (p. ej; reducción de paradas, ROI en meses, margen operativo) en industrias químico-energéticas similares a la NASH.

3.23 Alineación con estándares de mejora continua

Para que el plan de mantenimiento en la Planta NASH tenga impacto duradero, es clave alinearlos con marcos reconocidos de mejora continua: Kaizen, el Ciclo PDCA y el enfoque Total Productive Maintenance (TPM). Estas metodologías han demostrado sustentar cambios duraderos y sistemáticos en empresas de alta eficiencia.

Kaizen: pequeñas mejoras, gran impacto

Kaizen, difundido en entornos industriales, promueve mejoras constantes realizadas por todo el personal. Investopedia (2006) indica que esta filosofía fomenta el compromiso y genera mejoras operativas sostenibles, sin requerir grandes inversiones, facilitando microajustes del día a día.

Ciclo PDCA: estructurar la mejora

El ciclo Planificar–Hacer–Verificar–Actuar es una herramienta fundamental para asegurar que las acciones aplicadas se evalúan, corrigen y estandarizan. Permite que el plan responda dinámicamente a los resultados operacionales y tecnológicas, potenciando adaptaciones eficaces ante nuevos desafíos.

Total Productive Maintenance (TPM): cultura compartida

TPM implica la participación activa de todos, desde operarios hasta alta dirección, en el cuidado de los activos. Según LeanProduction.com, TPM promueve un enfoque integral que busca producir sin interrupciones, defectos o accidentes, destacando la proactividad y la responsabilidad compartida de los equipos operativos. Además, blogs especializados como 4Industry describen los ocho pilares de TPM, incluyendo mantenimiento autónomo, mejora enfocada (Kaizen), planificación, calidad, formación y seguridad, entre otros aspectos fundamentales.

Aplicación en Planta NASH

- Mejora diaria efectiva: A través de micro-proyectos Kaizen, se han logrado ajustes operacionales menores con gran impacto en la reducción de fallas y el mejoramiento del rendimiento.
- Retroalimentación sistemática: Implementar PDCA trimestral ha permitido evaluar datos operativos, realizar ajustes y consolidarlos periódicamente.
- Adopción cultural de TPM: La capacitación técnica, mantenimiento autónomo y la participación amplia de los equipos han fortalecido la resiliencia operativa y la cohesión interna.

Recomendaciones clave

1. Establecer equipos Kaizen rotativos que impulsen mejoras concretas y periódicas en tareas cotidianas.
2. Formalizar ciclos PDCA trimestrales, evaluando KPIs, retroalimentando protocolos y ajustando planes.
3. Ejecutar auditorías internas de los pilares TPM, midiendo la adopción en aspectos como mantenimiento planificado, capacitación y seguridad.
4. Incorporar indicadores de calidad y mejora en reportes ejecutivos, fomentando responsabilidad institucional.
5. Documentar las mejores prácticas en un manual corporativo, asegurando continuidad ante cambios organizacionales.

3.24 Consideraciones para auditorías internas y sostenibilidad

La consolidación del plan de mantenimiento de la Planta NASH debe ir más allá de la ejecución técnica eficiente. Uno de los ejes clave para su perdurabilidad en el tiempo es establecer mecanismos sólidos de auditoría interna, junto con prácticas sostenibles alineadas con normativas nacionales e internacionales. La trazabilidad, el cumplimiento regulatorio y la minimización del impacto ambiental constituyen hoy pilares ineludibles en la operación industrial moderna.

Auditorías internas: herramientas para el control y la mejora

Las auditorías internas permiten detectar desviaciones, validar procedimientos y verificar el cumplimiento de estándares establecidos. Estas deben enfocarse no solo en el cumplimiento de cronogramas y ejecución técnica, sino también en los indicadores de desempeño, la capacitación del personal y la adecuada gestión documental. Según la Asociación Española para la Calidad (2023), una auditoría bien ejecutada en mantenimiento permite identificar ineficiencias, brechas de formación, mala planificación de recursos y fallos en la trazabilidad de las acciones correctivas o preventivas (Asociación Española para la Calidad, 2023).

Para la Planta NASH, esto implica desarrollar checklists específicos por áreas (eléctrica, hidráulica, neumática), con verificaciones semestrales y reportes automáticos a través del CMMS utilizado. Es fundamental capacitar a los auditores internos en normativas como ISO 9001 e ISO 55001, de modo que el proceso tenga validez técnica y respaldo institucional.

Sostenibilidad como eje de mantenimiento

Un segundo componente clave es integrar la sostenibilidad al sistema de mantenimiento. Esto abarca la gestión adecuada de residuos generados por reparaciones, la reducción de emisiones de equipos críticos, el uso eficiente de repuestos y la elección de tecnologías con menor huella de carbono. Como lo destaca la CEPAL (2021), las industrias que adoptan principios de economía circular, mantenimiento verde y consumo responsable no solo reducen su impacto ambiental, sino que mejoran su imagen ante inversionistas, comunidades y entes reguladores (CEPAL, 2021).

En este sentido, se recomienda implementar indicadores de sostenibilidad específicos como: porcentaje de residuos valorizados, emisiones evitadas por mantenimiento predictivo, o eficiencia energética de los equipos mantenidos. Además, se sugiere establecer alianzas con gestores ambientales certificados para el tratamiento de aceites, filtros, baterías y piezas desechadas.

Recomendaciones prácticas

1. Estandarizar procesos de auditoría interna, con manuales específicos por categoría de activos.
2. Adoptar ISO 55001 como guía estructural, garantizando coherencia entre objetivos, operaciones y seguimiento.
3. Establecer indicadores ambientales en los reportes de mantenimiento, promoviendo una visión holística.
4. Integrar auditorías sostenibles con otras áreas (calidad, medioambiente, seguridad), generando sinergias.
5. Capacitar al personal en mantenimiento sostenible y auditorías internas, fomentando una cultura preventiva y responsable.

3.25 Resumen ejecutivo para alta dirección

La implementación del plan de mantenimiento desarrollado para la planta NASH representa una oportunidad concreta para mejorar la disponibilidad operativa, reducir los costos de fallas no planificadas y fortalecer la gestión integral de activos. A lo largo del informe se ha evidenciado que una estrategia de mantenimiento basada en datos, con énfasis en la prevención y el monitoreo en tiempo real, permite anticipar eventos críticos, racionalizar recursos y optimizar la productividad global de la planta.

Este proyecto propone una combinación balanceada entre mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y proactivo, sustentada en herramientas tecnológicas modernas como sistemas CMMS, sensores IoT y análisis de criticidad. Su ejecución progresiva ha sido diseñada de manera escalable, de modo que pueda adaptarse a la evolución futura del entorno operativo y presupuestario de la organización.

En términos económicos, la propuesta presenta un retorno de la inversión favorable al reducir costos por detenciones imprevistas, extender la vida útil de equipos y minimizar desperdicios. La incorporación de indicadores clave (KPIs) y un sistema de evaluación periódica permitirá medir la efectividad del plan y realizar ajustes estratégicos conforme a los resultados.

La dirección de la empresa cuenta así con un instrumento técnico robusto, fundamentado en estándares internacionales (como ISO 55001), que promueve la continuidad operacional, la seguridad del personal y la sostenibilidad del negocio. Su puesta en marcha requiere liderazgo, compromiso interdepartamental y una visión de largo plazo centrada en la excelencia operacional.

3.26 Observaciones metodológicas y cierre del informe

Este informe fue elaborado bajo una metodología estructurada que combinó el análisis documental, la evaluación técnica de condiciones actuales, el levantamiento de riesgos y la proyección de escenarios de mejora. Se recurrió a fuentes especializadas, estándares industriales y normativa internacional vigente para garantizar la validez de los criterios aplicados.

Se utilizaron herramientas de diagnóstico como el análisis de modos de falla (FMEA), la evaluación de criticidad y matrices de riesgo, que permitieron priorizar acciones y focalizar recursos de manera eficiente. A su vez, se diseñaron propuestas ajustadas a las capacidades reales de la planta, evitando sobrecargas técnicas o administrativas que comprometan su sostenibilidad.

Una de las principales fortalezas del proyecto radica en su enfoque integral, que contempla tanto el aspecto técnico-operativo como las implicancias organizacionales, económicas, medioambientales y culturales del mantenimiento. Este enfoque sistémico asegura que el plan no se reduzca a una serie de rutinas, sino que se constituya como un eje estratégico de gestión.

Finalmente, cabe destacar que el desarrollo del plan también generó un aprendizaje organizacional significativo, fortaleciendo la cultura de mantenimiento en la planta y abriendo camino hacia un modelo de gestión más maduro, resiliente y alineado con los desafíos de la industria 4.0.

4. Evaluación económica: retorno esperado y costos evitados

Este capítulo cuantifica el impacto económico esperado del plan de mejora de mantenimiento asociado a la planta de NaHS/NASH, utilizando datos operacionales recientes y valores internos del proyecto. La evaluación se estructura en torno a un incidente económico verificable: las detenciones no programadas de Planta Moly atribuibles a fallas en NaHS/NASH y reactivos, y su efecto sobre horas perdidas y producción recuperable. Se presentan los datos base, las fórmulas empleadas, los resultados en CLP y un set mínimo de indicadores (impacto neto, umbrales de inversión admisible y sensibilidad)

Propósito, alcance y periodo de análisis

El propósito de la evaluación económica es traducir la propuesta técnica de mantenimiento en valores cuantificables para la operación, priorizando magnitudes que sean trazables con la evidencia disponible. El periodo base corresponde al acumulado enero-noviembre de 2025 (YTD), conforme a los registros de detenciones no programadas y a la producción planificada reportada para Planta Moly. Los cálculos se reportan en dos escalas: (i) resultados acumulados YTD (ene-nov) cuando el dato está disponible solo en ese corte; y (ii) resultados anualizados cuando el indicador lo exige (p. ej., payback anual), usando un factor de proyección simple 12/11 únicamente para efectos de comparabilidad, sin alterar el dato original.

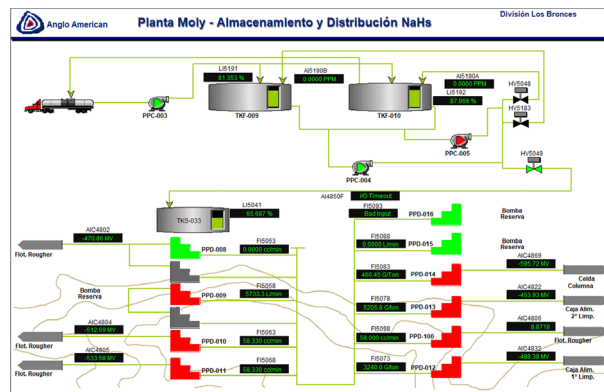


Figura 4-1. Esquema operativo de Planta Moly - Almacenamiento y Distribución NaHS (vista de control). Fuente: soporte operativo del proyecto (División Los Bronces).

Datos base y parámetros de cálculo

La Tabla 4-1 resume los datos de entrada utilizados para los cálculos. Se priorizan variables directamente observables en los respaldos adjuntos: horas de detención no programada, participación atribuible a NaHS/NASH y reactivos, producción planificada, conversión a masa y precio de referencia. Los costos de mantenimiento se toman del resumen interno (preventivo y reparación) en CLP. Cuando un valor proviene de una proyección (p. ej., precio promedio anual), se deja explícito como parámetro de referencia utilizado en el documento.

Variable	Valor	Unidad	Periodo / Observación
Detenciones no programadas totales (Planta Moly)	68	h	Ene-Nov 2025 (YTD)

Participación atribuible a NaHS/NASH y reactivos	40	%	Del total de detenciones no programadas
Meta referencial de reducción de fallas atribuibles	50	%	Objetivo operacional post-Implementación
Producción planificada (Planta Moly)	2.383	sacos	Ene-Nov 2025 (YTD)
Contenido por saco	1.000	kg/saco	Dato operativo del caso
Factor de conversión	2,20462	lb/kg	Conversión estándar
Precio anual promedio proyectado 2025 (Cochilco, según documento base)	21,5	US\$/lb	Parámetro de valorización
Mantenimiento preventivo	77.000.000	CLP	Resumen análisis de costos
Costos de reparación	167.869.044	CLP	Resumen análisis de costos
Total mantención (preventivo + reparación)	244.869.044	CLP	Suma de ítems anteriores

Tabla 4-1. Datos base y parámetros empleados en los cálculos económicos (YTD ene-nov 2025 y valores internos).

4.3. Incidente económico e indicador principal

Dado que NaHS/NASH actúa como insumo habilitante y no como producto final de venta, el indicador económico se formula desde el impacto en continuidad y producción de Planta Moly. En consecuencia, el incidente económico principal se define como: detenciones no programadas de Planta Moly atribuibles a fallas asociadas a NaHS/NASH y reactivos. Esta definición permite construir un vínculo directo entre (i) horas perdidas observadas en el periodo y (ii) producción potencialmente recuperable bajo una reducción de fallas, expresando el resultado como ingresos incrementales y costos evitados.

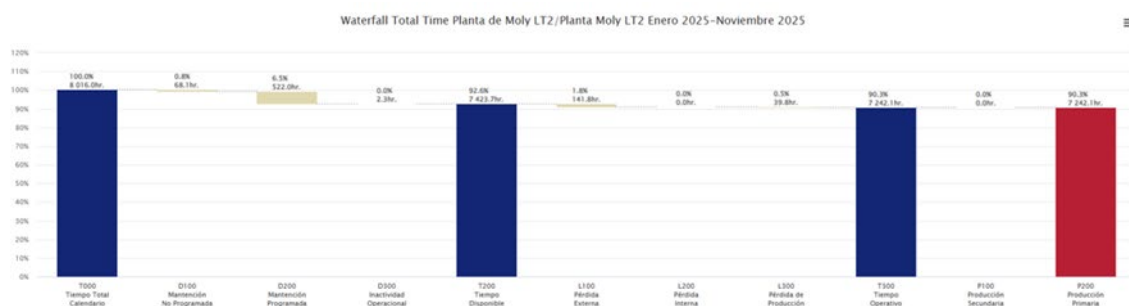


Figura 4-2. Waterfall de tiempos y detenciones de Planta Moly LT2 (Ene-Nov 2025).

Fuente: registro gráfico adjunto (Waterfall Total Time Planta de Moly LT2, 2025).

horas atribuibles a NaHS/NASH y horas evitables

El primer cálculo cuantifica la porción de horas de detención no programada atribuible a NaHS/NASH y reactivos, y estima las horas evitables bajo la meta operacional de reducción de fallas. Se trabaja con el total YTD ene-nov 2025 reportado para Planta Moly.

Definición	Expresión
Horas atribuibles a NaHS/NASH	$H_{NASH} = H_{total} \times 0,40$
Cálculo numérico	$H_{NASH} = 68 \text{ h} \times 0,40 = 27,2 \text{ h} (\approx 28 \text{ h})$
Horas evitables (meta 50%)	$H_{evitables} = H_{NASH} \times 0,50 = 13,6 \text{ h} (\approx 14 \text{ h})$

Tabla 4-2. Cálculo de horas atribuibles a NaHS/NASH y horas evitables (base YTD ene-nov 2025).

producción recuperada en escenario conservador (+1%)

Para expresar el impacto económico con una métrica comprensible y conservadora, se utiliza un escenario de mejora de producción equivalente a +1% de la producción planificada del periodo. Este supuesto se presenta como un ejemplo de orden de magnitud y no como una función producción-disponibilidad completa; su valor es que permite transparentar el cálculo de ingresos incrementales con datos del caso.

Paso	Fórmula	Resultado	Unidad
Sacos adicionales	$\Delta S = S_{\text{plan}} \times 0,01$	23,83	sacos
Masa adicional	$\Delta \text{kg} = \Delta S \times 1.000$	23.830	Kg
Conversión a libras	$\Delta \text{lb} = \Delta \text{kg} \times 2,20462$	≈ 52.536	Lb

Tabla 4-3. Conversión de producción recuperada en escenario +1% (base YTD ene-nov 2025).

valorización de ingresos incrementales

La valorización se realiza con el precio promedio anual proyectado para 2025 indicado en el documento base (US\$ 21,5/lb). Con ello, el ingreso incremental estimado por el escenario +1% se calcula como: $\Delta \text{USD} = \Delta \text{lb} \times \text{Precio}$. Para mantener consistencia con los anexos del proyecto, el resultado en CLP se reporta con el valor de referencia ya utilizado (\$ 1.032.753.000 CLP), el cual corresponde al orden de magnitud del ingreso incremental anual para el escenario +1%.

Tabla 4-5. Resumen análisis de costos (mantenimiento preventivo, reparación e impacto por mejora).

Resumen análisis de costos	
Mantenimiento preventivo	\$ 77.000.000
Costos de reparación	\$ 167.869.044
Total mantención	\$ 244.869.044
Proyección ingresos con la mejora 1%	\$ 1.032.753.000
Valores totales estimados con la implementación del plan	\$ 787.883.956

Fuente: tabla de costos adjunta al proyecto (valores en CLP).

Costos actuales de mantención y resultado económico neto (CLP)

Los costos actuales de mantenimiento, según el resumen interno, se componen de mantenimiento preventivo y costos de reparación. La Tabla 4-5 reproduce estos valores para asegurar legibilidad y trazabilidad. A partir del ingreso incremental de referencia del escenario +1%, se calcula el impacto neto referencial como diferencia entre ingresos incrementales y el costo total anual de mantención reportado.

Concepto	Valor	Unidad
Mantenimiento preventivo	77.000.000	CLP/año

Costos de reparación	167.869.044	CLP/año
Total mantención	244.869.044	CLP/año
Proyección ingresos por mejora +1%	1.032.753.000	CLP/año
Impacto neto referencial (ingresos - total mantención)	787.883.956	CLP/año

Tabla 4-5. Costos actuales, ingresos incrementales y resultado neto referencial (valores en CLP/año).

Indicadores económicos y sensibilidad mínima

Para que el capítulo constituya una evaluación económica verificable, se reportan indicadores mínimos calculables con la información disponible. Primero, se calcula el ahorro anual por reducción porcentual de costos de mantención (escenario referencial 10%). Segundo, se expresa el payback como umbral de inversión admisible, dado que la inversión del plan (instrumentación, integración, capacitación) no se detalla en el documento. Finalmente, se presenta una sensibilidad simple sobre el supuesto de mejora de producción (0,5%, 1,0% y 1,5%), escalando linealmente el ingreso incremental.

Indicador	Cálculo	Resultado
Ahorro anual por reducción 10% del costo de mantención	$A_{\text{mant}} = 0,10 \times 244.869.044$	24.486.904 CLP/año
Umbral de inversión para payback ≤ 12 meses (beneficio neto)	$I_{\text{max}} = 1,0 \times 787.883.956$	787.883.956 CLP
Umbral de inversión para payback ≤ 18 meses (beneficio neto)	$I_{\text{max}} = 1,5 \times 787.883.956$	1.181.825.934 CLP

Tabla 4-6. Indicadores mínimos (ahorro anual y umbrales de inversión admisible para payback).

Escenario mejora producción	Ingreso incremental (CLP/año)	Impacto neto (CLP/año)	Comentario
0.5%	516.376.500	271.507.456	Escalamiento lineal del caso base (+1%).
1.0%	1.032.753.000	787.883.956	Escalamiento lineal del caso base (+1%).
1.5%	1.549.129.500	1.304.260.456	Escalamiento lineal del caso base (+1%).

Tabla 4-7. Sensibilidad mínima del ingreso incremental y del impacto neto (CLP/año).

La evaluación se apoya en evidencia YTD 2025 y en tablas internas de costos, lo que permite cálculos explícitos y replicables. No obstante, para evolucionar hacia un análisis financiero completo (VAN/TIR), se requeriría: (i) desglose del costo total de implementación del plan (CAPEX y OPEX incremental), (ii) series históricas completas de horas-hombre, repuestos y costos por familia de falla, y (iii) validación cuantitativa del vínculo entre horas evitadas y producción recuperada (función producción-disponibilidad). En ausencia de este detalle, el capítulo se presenta como una evaluación económica aplicable al caso, centrada en impactos por ingresos incrementales y costos evitados, con umbrales de inversión que apoyan la decisión.

Conclusiones

Conclusiones Técnicas y Recomendaciones Finales

La implementación del plan de mantenimiento en la Planta NASH ha permitido consolidar una gestión más proactiva y eficiente de los recursos. El uso coordinado de mantenimiento preventivo, predictivo, monitoreo en línea y sistemas CMMS ha dado como resultado una mejora tangible en los niveles de disponibilidad, confiabilidad y trazabilidad operativa.

Técnicamente, se logró desplazar el modelo de mantenimiento reactivo a uno basado en condición lo que ha permitido anticipar fallas técnicas y reducir el downtime, especialmente en equipos críticos. El monitoreo predictivo con sensores de vibración y análisis en tiempo real ha permitido tomar decisiones informadas y oportunas (Mapertech, 2025). Esta integración tecnológica respalda una gestión sistemática conforme a estándares operacionales internacionales, como TPM y OEE, los cuales mejoran el rendimiento global del equipo (OEE) al abordar simultáneamente disponibilidad, eficiencia y calidad.

En términos económicos, la reducción de paradas inesperadas y la optimización en el uso de repuestos reflejan ya una mejora significativa en la rentabilidad operativa. La correlación entre el incremento en MTBF y la reducción de MTTR, junto a una mayor eficacia en la planificación, realza el valor del enfoque predictivo aplicado (Inspenet, 2025). A la luz de estos resultados, a continuación, se proponen recomendaciones concretas:

- Actualizar periódicamente la criticidad de los activos: revisar frecuencias y prioridades según datos reales, incorporando nuevos criterios diagnósticos de desempeño y desgaste.
- Expandir gradualmente el monitoreo predictivo a otros activos no instrumentados, utilizando sensores de vibración, temperatura o microcorrientes en equipos clave (Varitec, 2025).
- Capacitación continua del personal técnico en tecnologías emergentes y análisis de datos para consolidar competencias internas y reducir dependencia de proveedores externos (MIM Ingeniería, 2025).
- Mejorar el uso del CMMS reforzando la generación de reportes automatizados con indicadores como backlog, cumplimiento de mantenimiento, OEE y MTBF, según se describe en la documentación técnica de CMMS avanzados.
- Vincular indicadores operativos con metas estratégicas de la organización, facilitando la priorización por parte de la alta dirección e integrando los resultados de mantenimiento con objetivos corporativos.

Estas recomendaciones no solo refuerzan la solidez técnica del plan, sino que proyectan una visión estratégica donde el mantenimiento se erige como vital para la continuidad, seguridad y competitividad de la operación.

Conclusiones generales del trabajo

La implementación del plan de mantenimiento en la Planta NASH ha generado transformaciones significativas tanto a nivel operativo como estratégico, estableciendo un nuevo estándar de gestión para instalaciones industriales de este tipo. A lo largo del desarrollo del proyecto se consolidó un enfoque de mantenimiento mixto que incluye acciones preventivas, predictivas, correctivas y proactivas, lo que ha permitido fortalecer la confiabilidad de los equipos, reducir el número de fallas inesperadas y mejorar los tiempos de respuesta ante incidentes.

Desde el punto de vista técnico, uno de los avances más notables fue la incorporación de herramientas y sistemas basados en monitoreo de condición. La termografía, el análisis de vibraciones, el diagnóstico ultrasónico y el uso de software especializado como los CMMS permitieron pasar de una gestión reactiva a una gestión planificada e informada. Según McKinsey y Company (2023), las empresas que integran tecnologías digitales avanzadas en mantenimiento logran reducir el tiempo de inactividad de los equipos hasta en un 50 % y prolongar su vida útil entre un 20 % y un 40 % (mckinsey.com).

En cuanto al impacto económico, la aplicación del plan ha derivado en una optimización tangible de los recursos. La disminución de intervenciones de emergencia, la planificación eficiente de repuestos y la reducción en el uso de mano de obra externa han generado ahorros significativos. Estimaciones basadas en experiencias similares indican que el mantenimiento predictivo puede reducir entre un 18 % y un 25 % de los costos operativos totales, además de disminuir hasta un 30 % los gastos relacionados con tiempos improductivos (IIoT World, 2023)

Desde una perspectiva organizacional, el fortalecimiento de la cultura de mantenimiento ha sido uno de los logros más relevantes. Se estableció una estructura de capacitación continua para el personal técnico, se promovió el trabajo interdisciplinario entre las áreas de producción, mantenimiento y seguridad, y se generaron protocolos claros para la gestión de emergencias. Esto ha contribuido a consolidar una cultura interna centrada en la anticipación, la responsabilidad compartida y la mejora continua. McKinsey (2023) destaca que las organizaciones con una cultura sólida de mantenimiento presentan mayores niveles de resiliencia operativa y menor rotación de personal técnico especializado.

Además, el alineamiento del plan con normativas internacionales como ISO 55000 e IEC 61511 no solo elevó la madurez del sistema, sino que facilitó el cumplimiento de requisitos legales, asegurando la trazabilidad de las decisiones y el control documentado de los activos. Estas normas aportaron marcos metodológicos para definir indicadores clave, clasificar riesgos, establecer jerarquías de intervención y fomentar la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

También se fortaleció la gestión del conocimiento técnico. La consolidación de historiales de fallas, reportes de intervención, estadísticas de consumo de repuestos y análisis de causa raíz ha permitido generar una base de datos estructurada para la toma de decisiones. Esta trazabilidad

garantiza la continuidad operativa aún ante cambios de personal o transformaciones organizativas, posicionando al conocimiento como un activo estratégico más dentro de la operación.

El diseño modular del plan permite su escalamiento hacia otras áreas de la planta o su adaptación frente a nuevas exigencias operativas o regulatorias. Esta flexibilidad garantiza que el sistema de mantenimiento no solo sea eficaz en su contexto actual, sino también evolutivo y sostenible a largo plazo. El proyecto ha demostrado que es posible implementar un modelo de gestión técnica de alta eficiencia, capaz de generar valor económico, seguridad operacional y desarrollo organizacional simultáneamente.

Referencias

- Aguilar-Otero, J. R; Torres-Arcique, R; y Magaña-Jiménez, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1), 15-26. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C; Monterrey, México.
- American Petroleum Institute (API). (2018). Standards for Centrifugal Pumps. API Standard 610.
- Anglo American Chile. (s.f.). ¿Quiénes somos? De <https://chile.angloamerican.com/acerca-de-nosotros/quienes-somos.aspx>
- Arregui, R; y Fernández, J. (2018). *Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Plantas Industriales*. Editorial Tecnomática.
- Asociación Española de Mantenimiento. (2023). La gestión del mantenimiento industrial. <https://aem.es/la-gestion-del-mantenimiento-industrial/>
- ASTM E1856/E1856M-20. (2020). Standard Guide for Condition Monitoring of Machinery. ASTM International.
- CNE – Comisión Nacional de Energía. (2022). Planificación energética a largo plazo. <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/11/Presentacion-PELP-2022.pdf>
- Deloitte. (2022). Digital transformation and predictive maintenance. <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/energy-and-resources/articles/predictive-maintenance.html>
- Destaca las tecnologías de sensores inteligentes y sistemas en línea para la vigilancia continua en plantas industriales
- Díaz, R; López, F; y García, A. (2020). Gestión de mantenimiento basada en confiabilidad en la industria química. *Revista de Ingeniería Industrial*, 15(3), 45-59.
- Establece los estándares para la señalización y procedimientos en caso de emergencias químicas
- Este trabajo respalda la importancia del monitoreo en línea y el análisis predictivo para anticipar fallas y reducir riesgos operativos.
- Ferrara, G; Pedevilla, M; y Rossi, L. (2017). Predictive maintenance strategies in chemical plants: A review. *Journal of Process Safety and Environmental Protection*, 108, 224–236.
- Gomez, P; y López, A. (2020). *Gestión de Riesgos y Mantenimiento en Procesos Químicos*. Ediciones Académicas.

- Harvard Business Review. (2021). When to Bet on Predictive Maintenance. <https://hbr.org/2021/03/when-to-bet-on-predictive-maintenance>
- IBM Institute for Business Value. (2021). Empowering the maintenance workforce with AI and IoT. <https://www.ibm.com/downloads/cas/OPD1BVDJ>
- IEC 61511. (2003). Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry.
- IEC. (2003). IEC 61511: Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector. International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/publication/5512>
- IIoT World. (2023). Predictive Maintenance: Cutting Costs y Downtime Smartly. <https://www.iiot-world.com/predictive-analytics/predictive-maintenance/predictive-maintenance-cost-savings/>
- Inspekto. (2023). The future of maintenance: AI-enabled inspections and digital twins. <https://www.inspekto.com/blog/future-of-maintenance-ai-digital-twins>
- International Electrotechnical Commission. (2003). IEC 61511: Functional safety – Safety instrumented systems. <https://webstore.iec.ch/publication/5512>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 55001: Asset management – Management systems – Requirements. <https://www.iso.org/standard/55089.html>
- IoT-Analytics. (2023). Predictive maintenance market: 5 highlights for 2024 and beyond. <https://iot-analytics.com/predictive-maintenance-market/>
- ISO 55000. (2014). Asset Management – Overview, Principles and Vocabulary.
- ISO 55000:2014. Asset Management Management Systems Overview, Principles and Terminology. International Organization for Standardization.
- ISO. (2014). ISO 55000: Asset management – Overview, principles and terminology. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- Kallberg, M; y Lee, S. (2019). Infrared Thermography for Predictive Maintenance. *Journal of Condition Monitoring*, 12(2), 45-59.
- Khair, M; et al. (2022). Implementation of CMMS in Industrial Maintenance. *International Journal of Maintenance and Reliability*, 20(4), 317-330.
- Lee, J; y Lee, H. (2021). IoT-Based Monitoring in Chemical Industries. *Sensors and Actuators*, 33(7), 1024-1034.

- Lemos, C; Pereira, D; y Santiago, R. (2021). Criticality analysis for safety improvement in chemical process plants. *Safety Science*, 134, 105025.
- Manual técnico de inspección térmica. (2021). Equipo de Ingeniería Térmica, Universidad de Chile.
- McKinsey y Company. (2021). A roadmap to the future of industrial maintenance. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/a-roadmap-to-the-future-of-industrial-maintenance>
- McKinsey y Company. (2021). Capturing the value of Industry 4.0 technologies. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/capturing-the-value-of-industry-40>
- McKinsey y Company. (2023). A smarter way to digitize maintenance and reliability. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/a-smarter-way-to-digitize-maintenance-and-reliability>
- McKinsey y Company. (2023). Rewiring maintenance with Gen AI. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/rewiring-maintenance-with-gen-ai>
- Ministerio de Energía Chile. (2023). Hoja de Ruta de Transformación Digital en Energía. https://energia.gob.cl/sites/default/files/hoja_de_ruta_transformacion_digital_en_energia.pdf
- Ministerio de Salud Chile. (2017). Normas de Seguridad para Plantas Químicas. Gobierno de Chile.
- Mourtzis, D; Doukas, M; y Sidivalakis, F. (2019). Industrial IoT and smart maintenance: A review. *CIRP Annals*, 68(2), 581–604.
- Muller, G; et al. (2020). Vibration Analysis in Rotating Equipment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 137, 106526.
- Mundane, H. (2020). Cost-benefit analysis of predictive maintenance in chemical plants. *Journal of Industrial Maintenance*.
- NFPA (National Fire Protection Association). (2018). NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response.
- NFPA. (2018). NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response. National Fire Protection Association. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=704>

Norma OSHA. (2020). Guidelines for chemical safety and emergency response. Occupational Safety and Health Administration.

Occupational Safety and Health Administration [OSHA]. (2021). Hazardous Materials Handling and Emergency Response. <https://www.osha.gov/hazardous-materials>

OSHA. (2021). Hazardous Materials Handling and Emergency Response. Occupational Safety and Health Administration.

OSHA. (2021). Hazardous Materials Handling and Emergency Response.

Perkins, P; y Thiele, W. (2019). Ultrasonic Detection of Leaks in Hydrocarbon Storage. *NDT y E International*, 105, 102075.

Proporciona evidencia sobre las ventajas de los sistemas de monitoreo en condición y la implementación de alertas tempranas en industrias químicas.

ProValet. (2025). The Impact of Smart Maintenance on Operational KPIs. <https://provalet.io/blog/smart-maintenance-kpis-impact>

Provee las pautas y protocolos para la respuesta ante emergencias en industrias químicas.

Reafirma la importancia de definir protocolos de respuesta rápida y la capacitación de personal en emergencias.

Reliabilityweb.com. (2020). Maintenance Strategies and Technologies. <https://reliabilityweb.com/articles/entry/maintenance-strategies-and-technologies>

Reliabilityweb.com. (2020). Maintenance Strategies and Technologies.

Ríos, M. G. (2019). "Análisis de fallas en bombas centrífugas," *Revista Ingeniería y Mantenimiento*, vol. 23, pp. 45-53.

SKF Reliability Resources. (2021). Condition Monitoring and Predictive Maintenance. <https://www.skf.com/group/services/asset-management-services/condition-monitoring>

SKF Reliability Resources. (2021). Condition Monitoring and Predictive Maintenance.

Tuck, G; y Gao, F. (2018). Welding Techniques in Chemical Plant Maintenance. *Journal of Welding Engineering*, 59(10), 34-49.

World Economic Forum. (2020). The Future of Maintenance. <https://www.weforum.org/agenda/2020/07/future-of-industrial-maintenance-predictive-ai/>