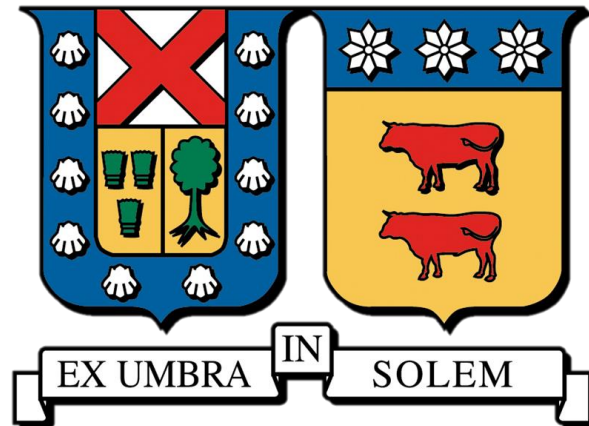


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de ingeniería mecánica
VALPARAÍSO - CHILE



Diseño de un plan de mantenimiento para la fase inicial del tren de impulsión de salmuera y el sistema de riego de pilas de lixiviación en Faena El Toco – SQM

RICARDO SEBASTIÁN OJEDA GÓMEZ

**MEMORIA DE TÍTULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

Profesor guía: Dr. Ing. Pedro Sariego P.

Profesor correferente: MBA Ing. René Valdenegro O

Marzo-2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo:

DISEÑO de un PLAN de MANTENIMIENTO PARA LA fase inicial de | Tron de Imposición de Salmuera y el sistema de riego de Pilas de Lixiviación en FAENA el T.O.O. - SQM

Nombre del candidato(a):

Ricardo Sebastián Oseda Gómez

Carrera / Grado:

INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

Campus: CASA Central VALPARAÍSO Departamento: INGENIERÍA MECÁNICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pedro Santiago Pastén 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 (marcar una opción)

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 (marcar una opción):

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: 20/03/2020

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 16/03/2020

Firma:

Resumen

Este informe presentó el diseño de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) para la faena El Toco (SQM), cuya exigencia operacional requirió asegurar continuidad para contribuir al objetivo de 1.500 ton/año de yodo en la planta Pedro de Valdivia. El alcance consideró el porteo de salmuera hacia la planta y los sistemas de riego de pilas de lixiviación, integrando una cadena de cinco estaciones de bombeo (Toco Norte, Toco Sur, María Elena, Coya Sur y Vergara).

El trabajo se desarrolló en un contexto operativo particular: la línea se encontró en comisionamiento final y pre-entrega, con recepción gradual de activos, coexistiendo equipos en servicio, en pruebas y aún en montaje. Dado que se trató de una faena nueva y con ausencia de historial de fallas, se aplicó una metodología cualitativa y semi-cuantitativa, apoyada en los lineamientos de ISO 55000 (gestión de activos) e ISO 31000 (gestión de riesgos) para sustentar la jerarquización de activos y el diseño del plan.

La propuesta se estructuró en siete etapas: (1) definición de objetivos y alcance; (2) inventario y jerarquización por criticidad; (3) aplicación de AMFE en equipos críticos; (4) diseño de planes PM/CBM (frecuencias, criterios de disparo y evidencias);(5) establecimiento de indicadores de seguimiento (cumplimiento PM, disponibilidad, MTBF, MTTR e incidencias);(6)Planificación de repuestos críticos y (7) generación de SOP para la operación de la línea de impulsión, En términos de gestión, se planteó normalizar el árbol de activos y su codificación para asegurar trazabilidad, jerarquizar mediante matriz de criticidad considerando riesgos de seguridad y producción, y estandarizar procedimientos operacionales esenciales.

Se estableció el soporte para control y mejora continua: una vez en operación el sistema completo , se consideró el uso del software interno SIPRO para registrar eventos y realizar seguimiento operacional y de mantenimiento permitiendo que, a medida que se consolidara el historial, las decisiones migraran hacia un enfoque basado en evidencia y se ajustaran umbrales y frecuencias del plan.

Un componente central del plan fue la planificación de repuestos críticos, la cual se sustentó en registros del ERP SAP (módulo CO) y en la experiencia de plantas comparables (PV y PB), donde se utilizaron bombas equivalentes (SPL-6, SPL-8 y Gould 3196 Lti). Esto permitió identificar repuestos críticos y patrones de consumo para definir cantidades y momentos de compra. Se definió como repuesto crítico a aquellos cuya degradación pudo gatillar modos de falla relevantes que afectarían directamente la disponibilidad del sistema. Para dimensionar el impacto económico de detenciones, el informe estimó que cada hora de detención representó una pérdida del orden de US\$10.130, reforzando que la gestión de repuestos actúa como habilitador de continuidad operacional.

En conjunto, el modelo propuesto aportó una base inicial para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los activos, reducir paradas no programadas y costos asociados, y estandarizar prácticas operacionales y de mantenimiento; alineando riesgos, mantenimiento e inventarios con los objetivos estratégicos de SQM para operar de forma segura, eficiente y sostenible desde la etapa inicial de la faena.

Abstract

This report presented the design of a Reliability-Centered Maintenance (RCM) plan for the El Toco operation (SQM), whose operational requirements demanded ensuring continuity to contribute to the target of 1,500 t/y of iodine at the Pedro de Valdivia plant. The scope covered brine conveyance to the plant and the irrigation systems for leaching heaps, integrating a chain of five pumping stations (Toco Norte, Toco Sur, María Elena, Coya Sur, and Vergara).

The work was carried out in a particular operational context: the line was in final commissioning and pre-handover, with assets being gradually received, and equipment coexisting in operation, under testing, and still under installation. Since this was a new operation with no failure history, a qualitative and semi-quantitative methodology was applied, supported by the guidelines of ISO 55000 (asset management) and ISO 31000 (risk management) to underpin asset prioritization and the plan design.

The proposal was structured in seven stages: (1) definition of objectives and scope; (2) inventory and criticality-based prioritization; (3) application of FMEA to critical equipment; (4) design of PM/CBM plans (frequencies, trigger criteria, and evidence); (5) establishment of performance indicators (PM compliance, availability, MTBF, MTTR, and incidents); (6) planning of critical spare parts; and (7) development of SOPs for operation of the discharge (pumping) line. From a management standpoint, the proposal included standardizing the asset hierarchy and its coding to ensure traceability, prioritizing assets through a criticality matrix considering safety and production risks, and standardizing essential operating procedures.

Support for control and continuous improvement was established: once the complete system entered operation, the use of the internal SIPRO software was considered to record events and perform operational and maintenance follow-up, enabling decisions to migrate toward an evidence-based approach as the history was consolidated, and allowing plan thresholds and frequencies to be adjusted.

A central component of the plan was critical spare parts planning, supported by records from the SAP ERP (CO module) and the experience of comparable plants (PV and PB), where equivalent pumps were used (SPL-6, SPL-8, and Goulds 3196 LTi). This made it possible to identify critical spares and consumption patterns to define purchase quantities and timing. Critical spare parts were defined as those whose degradation could trigger relevant failure modes that would directly affect system availability. To size the economic impact of downtime, the report estimated that each hour of stoppage represented a loss on the order of US\$10,130, reinforcing that spare parts management acts as an enabler of operational continuity.

Overall, the proposed model provided an initial basis to increase asset availability and reliability, reduce unplanned shutdowns and associated costs, and standardize operational and maintenance practices, aligning risk, maintenance, and inventories with SQM's strategic objectives to operate safely, efficiently, and sustainably from the initial stage of the operation.

Índice

Índice de figuras	5
Índice de cuadros	6
1. Contexto Organizacional	12
1.1. Organigrama Unidad de mantenimiento TOCO.....	13
1.2. Situación actual de la unidad de mantenimiento.....	14
1.2.1. Propuesta de trabajo a desarrollar y metodología.....	15
1.2.2. Carta gantt tentativa.....	16
2. Explicación de la línea de impulsión	17
2.1. Descripción general	17
2.2. Toco Norte	18
2.3. Toco Sur.....	19
2.4. María Elena (Poza 0).....	21
2.5. Coya sur	22
2.6. Vergara	23
2.7. Desafíos	24
3. Jerarquización de Equipos	25
3.1. Identificación de riesgos.....	25
3.2. Análisis de criticidad	26
4. AMFE equipos críticos	29
4.1. Funciones de los activos.....	29
4.2. Fallas funcionales.....	30
4.3. Modos de fallas.....	31
4.4. Efectos y consecuencias de las fallas.....	32
4.5. Presentación de resultados AMFE.....	34
4.5.1. AMFE Bombas centrífugas	34
4.5.2. AMFE Bombas verticales.....	35
5. Plan de mantenimiento	36
5.1. Definición de tareas de mantenimiento	38
5.2. Software de control e indicadores.....	43
6. Planificación de repuestos críticos	44
6.1. Repuestos críticos.....	44
6.2. Tratamiento de las bases de datos	45
7. Procedimientos Operativos Estándar (SOP's)	48
7.1. SOP Puesta en marcha porteo de salmuera	49

7.1.1. Diagrama de flujo con instrumentación para el control.....	50
7.1.2. Puesta en marcha Porteo	50
7.1.3. Detención Programada	52
7.1.4. Detenciones de emergencia.....	53
8. Conclusión y sugerencias	54
Referencias	56
Appendices	57
A. Frecuencia y cantidad de compras	57

Índice de figuras

1.	Trazado Toco Norte-Pedro de Valdivia.[7].....	12
2.	Diagrama de proceso simplificado.	12
3.	Organigrama TC.	13
4.	Matriz RACI.	14
5.	Modelo de gestión de mantenimiento.[5]	15
6.	Carta gantt tentativa.....	16
7.	Diagrama de flujo simplificado.[7].....	17
8.	Pozas Toco Norte.....	18
9.	Configuración de bombas poza del agua Toco Norte.....	18
10.	Configuración equipos de salmuera Toco Sur.....	19
11.	Configuración bombas de agua Toco Sur.....	20
12.	Poza 0	21
13.	Tk 800 en reparaciones (actualmente está reparado).....	22
14.	Configuración de bombas en Coya Sur	22
15.	Perfil de elevación Vergara-Pedro de Valdivia.[10]	23
17.	Matriz de criticidad SQM.....	28
18.	Jerarquización de Equipos.	28
19.	Diagrama decisión de consecuencias.[1]	32
20.	Lógica de decisión RCM.[1]	36
21.	Diagrama de flujo porteo de salmuera.....	50

Índice de cuadros

1.	Listado de equipos Toco Norte.....	19
2.	Listado de equipos Toco Sur.....	20
3.	Listado de equipos Poza 0.....	21
4.	Listado de equipos Coya sur.....	22
5.	Listado de equipos Vergara.....	23
6.	Listado de equipos.....	25
7.	Listado Equipos Críticos.....	29
8.	AMFE – Bombas autocebantes: fallos funcionales y modos de falla.....	31
9.	Bombas autocebantes: modos de falla y efectos de la falla.....	33
10.	AMFE Bombas centrífugas.....	34
11.	AMFE Bombas verticales.....	35
12.	Estrategia de mantenimiento bombas autocebantes.....	39
13.	Estrategia de mantenimiento bombas centrífugas.....	40
14.	Estrategia de mantenimiento bombas verticales.....	42
15.	Repuestos críticos.....	46
16.	Proyección de repuestos 2026 (cantidades mensuales).....	57

Introducción

La faena El Toco se encuentra en una etapa de puesta en marcha y consolidación operacional en la que la continuidad del transporte de salmuera y el riego de pilas de lixiviación se vuelven funciones críticas para asegurar el desempeño del proceso y el cumplimiento de metas productivas. En este escenario, la operación depende de una infraestructura distribuida compuesta por estaciones de bombeo y equipos electromecánicos que trabajan en condiciones exigentes, con control remoto y supervisión en tiempo real para prevenir eventos operacionales no deseados (por ejemplo, pérdidas de contención o detenciones por protecciones). Adicionalmente, al tratarse de una operación nueva, existe una brecha natural de información histórica respecto de fallas y degradación, lo cual obliga a construir una línea base técnica que permita operar y mantener los activos con criterios sistemáticos desde el inicio.

Frente a este desafío, el presente informe desarrolló una propuesta de gestión del mantenimiento orientada a incrementar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los activos críticos asociados a la línea de impulsión de salmuera y al sistema de riego. La propuesta se sustentó en el enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) como metodología principal para definir tareas, frecuencias y criterios de intervención en función de las funciones del sistema, sus fallas funcionales y los modos de falla con mayor impacto. Como soporte metodológico complementario, se consideraron lineamientos de ISO 55000 para mantener coherencia con una visión de gestión de activos y de ISO 31000 para estructurar la identificación y análisis de riesgos, aplicados de forma parcial y adaptada al contexto de comisionamiento.

El trabajo se estructuró mediante un proceso que incluyó el levantamiento y caracterización del sistema, la construcción del inventario de activos, la jerarquización por criticidad para focalizar recursos en los equipos más relevantes, y el desarrollo de análisis tipo AMFE como base para seleccionar estrategias de mantenimiento (preventivo, a condición y actividades de búsqueda de fallas). En paralelo, se incorporó la dimensión logística y económica mediante la planificación de repuestos críticos, apoyada en información disponible en el ERP (SAP, módulo CO) y en la experiencia de plantas comparables, con el objetivo de reducir tiempos de reparación y evitar indisponibilidades por falta de materiales. Finalmente, se definieron indicadores de gestión (cumplimiento del plan, disponibilidad, MTBF, MTTR e incidencias) y un esquema de registro y retroalimentación mediante el software interno de la compañía, de modo de habilitar la mejora continua del plan a medida que se consolide el historial operacional.

En síntesis, este informe entregó una base técnica y operacional para implementar un mantenimiento planificado y medible desde la etapa inicial de El Toco, conectando confiabilidad, riesgo, repuestos y control operacional, con el propósito de asegurar la continuidad del proceso y fortalecer la gestión de activos en régimen.

Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es aplicar un modelo de gestión de mantenimiento para los sistemas de riego de pilas de lixiviación y porteo de salmuera a planta de yoduro Pedro de Valdivia .

Objetivos específicos

- Generar inventario de activos de la faena EL TOCO
- Jerarquizar activos por criticidad
- Realizar análisis de modos de falla y efecto (AMFE) para equipos críticos
- Generar planes de mantenimiento aplicando RCM
- Generar la planificación de repuestos.
- Establecer Procedimiento operacional estandarizado (SOP) para operación de la línea de impulsión.

Marco Teórico

Mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial se define como el conjunto de actividades técnicas, administrativas y de gestión orientadas a conservar o restaurar equipos, instalaciones y sistemas productivos a un estado en el que puedan cumplir la función para la que fueron diseñados, se pueden diferenciar dos tipos de mantenimiento a grandes rasgos estos son:

Mantenimiento una vez ha ocurrido la falla

- **Mantenimiento Correctivo (C):** Este se lleva a cabo una vez el equipo ha fallado puede ser planeado (equipos de baja criticidad y rápida reparación) o inesperado.
- **Mantenimiento proactivo:** Es la práctica de implementar sistemas de mejora continua para encontrar las causas basales que llevaron el activo a la falla inesperada

Mantenimiento antes de la falla

- **Mantenimiento predictivo (CBM):** acciones basadas en el monitoreo de la condición real del activo (vibraciones, temperatura, análisis de aceite, ultrasonido), que permiten anticipar la falla y actuar solo cuando los indicadores lo sugieren
- **Mantenimiento preventivo (PM):** intervenciones planificadas a intervalos regulares de tiempo o uso, basadas en recomendaciones del fabricante o en la experiencia operativa (ej. cambio de rodamientos cada cierto número de horas de trabajo).
- **Mantenimiento proactivo:** son las acciones que se toman en las fases de diseño de los equipos o procesos con el propósito de facilitar el mantenimiento.

Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática que busca asegurar que los activos físicos de una organización cumplan de manera continua y confiable las funciones para las que fueron diseñados. Su enfoque principal radica en analizar las funciones de cada activo, identificar los modos de falla más probables y comprender las consecuencias que dichas fallas tendrían sobre la operación, la seguridad, el medio ambiente y los costos.

A diferencia de los enfoques tradicionales de mantenimiento correctivo o preventivo calendarizado, el RCM establece que no todas las fallas deben prevenirse al mismo nivel, sino que se debe priorizar la gestión en función de la criticidad de los equipos y de las consecuencias

asociadas a sus fallas. Esta visión permite diseñar planes de mantenimiento que combinan de manera óptima tareas preventivas, predictivas y correctivas. En su aplicación práctica, el RCM se estructura alrededor de siete preguntas clave que ordenan el análisis y la toma de decisiones:

1. ¿Cuáles son las funciones del activo y qué estándares de desempeño deben cumplirse?
2. ¿De qué maneras puede dejar de cumplir cada función?
3. ¿Qué eventos específicos pueden causar cada falla funcional?
4. ¿Qué ocurre cuando se presenta cada modo de falla?
5. ¿Por qué importa que ocurra?
6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada modo de falla?
7. ¿Si no existe una tarea eficaz, qué corresponde hacer?

Modelo de gestión del mantenimiento

Un modelo de gestión del mantenimiento es un enfoque estructurado que integra políticas, procesos, recursos, indicadores y herramientas orientadas a garantizar que los activos físicos mantengan su capacidad funcional durante su ciclo de vida, asegurando la continuidad operacional, la confiabilidad y la seguridad del proceso productivo. Este modelo establece la planificación, ejecución, control y mejora continua de las actividades de mantenimiento, considerando estrategias preventivas, predictivas y correctivas, así como la gestión de repuestos, recursos humanos y sistemas de información. Su propósito es optimizar el equilibrio entre desempeño, riesgo y costo, alineando la función de mantenimiento con los objetivos estratégicos de la organización y contribuyendo a la sostenibilidad operativa del sistema productivo.

Normas ISO

Para el desarrollo de este trabajo se consideran los principios y lineamientos establecidos en las normas ISO 55001 para la gestión de activos y ISO 31000 para la gestión del riesgo, utilizándolos como marco metodológico de referencia para la definición del enfoque, los criterios de priorización y las herramientas aplicadas. No obstante, cabe precisar que este trabajo no constituye una implementación completa de dichas normas, sino una aplicación parcial y adaptada a las necesidades específicas de la faena más en concreto la línea de impulsión de salmuera y el riego de pilas, orientada a estructurar el proceso inicial de planificación de mantenimiento y gestión de riesgos en un contexto operacional de puesta en marcha. En consecuencia, se adoptan los elementos más relevantes y factibles de ambas normas para esta etapa, tales como la alineación estratégica, la evaluación de criticidad, el análisis de

fallas y la definición de controles, reconociendo que una implementación integral requeriría un desarrollo organizacional, documental y de sistemas más amplio y progresivo.

1. Contexto Organizacional

Como se mencionó en la introducción este trabajo se enmarca dentro de las actividades de la superintendencia de mantenimiento de Pedro de Valdivia (PV), Pampa Blanca (PB) y TOCO (TC), más en específico en la unidad de mantenimiento del TOCO.

El TOCO es una faena salitrera de larga data, la cual fue re-abierta y reacondicionada para producir yodato (brine) mediante pilas de lixiviación y alimentar la planta de yoduro en Pedro de Valdivia. La faena TC se encuentra aproximadamente a 70 km de PV, para lograr transportar la salmuera desde TC a PV se construyó una línea de impulsión con 5 estaciones de bombeo las cuales son Toco norte (TCN), Toco sur (TCS), Poza 0 (P0), Coya sur (CS) y Vergara (V).



Figura 1: Trazado Toco Norte-Pedro de Valdivia.[7]

Para entender mejor las funciones que debe desempeñar esta unidad se presenta el siguiente diagrama simplificado del proceso de impulsión.

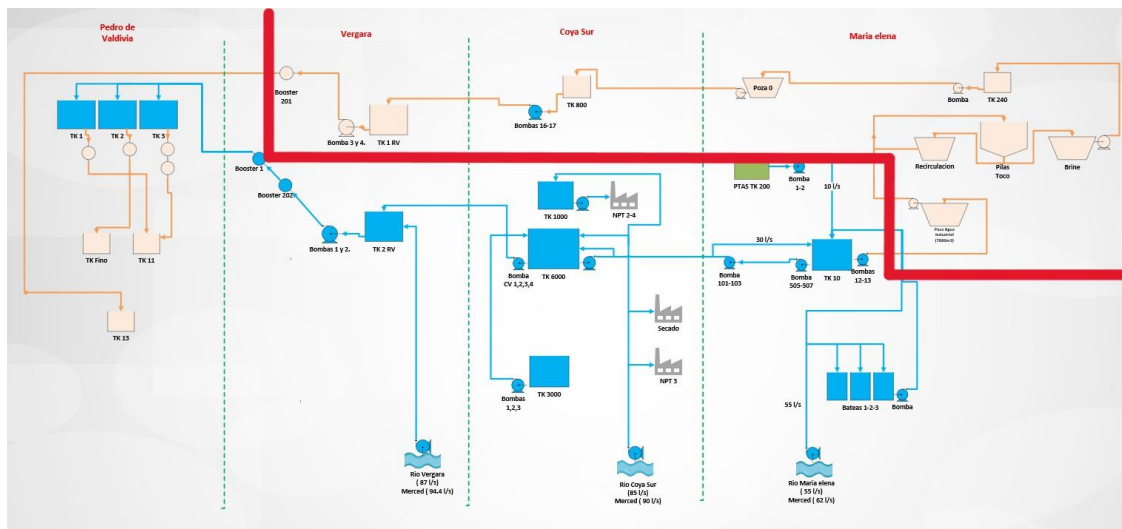


Figura 2: Diagrama de proceso simplificado.

La unidad de mantenimiento del TOCO tiene como objetivo principal la mantención de los equipos electromecánicos (bombas, motores eléctricos, válvulas, vdf, etc) responsables del riego de las pilas de lixiviación y de los equipos del Porteo de salmuera (Equipos por sobre la línea roja en Fig 2.), al tratarse de una nueva faena no existen los planes de mantenimiento

preventivo (PM) ni predictivo (CBM) de estos equipos, es en este contexto que el superintendente de mantención ha encargado el trabajo de la generación de dichos planes y además una planificación de repuestos estratégicos.

1.1. Organigrama Unidad de mantenimiento TOCO

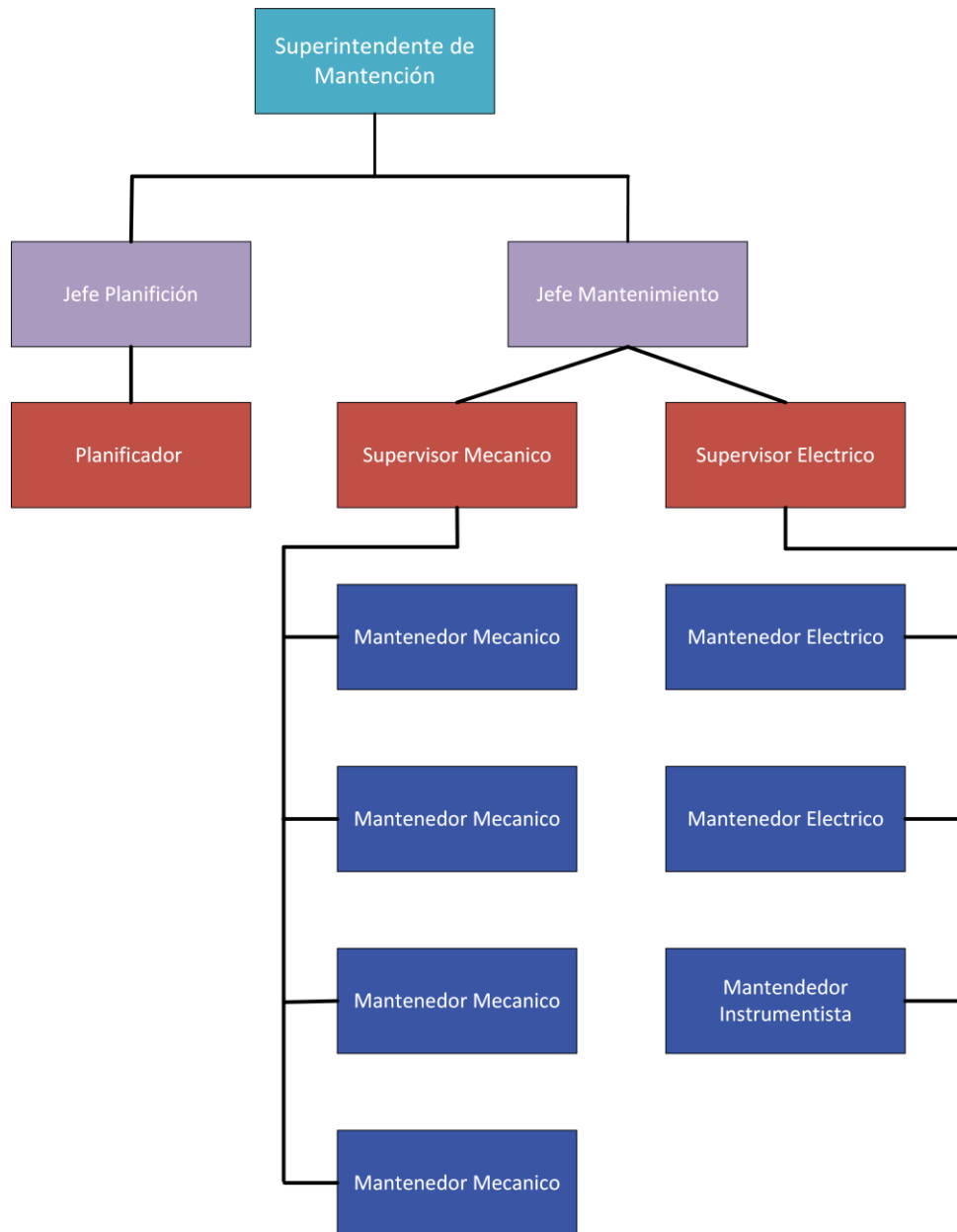


Figura 3: Organigrama TC.

1.2. Situación actual de la unidad de mantenimiento

La línea de impulsión de salmuera o porteo de brine se encuentra en fase de comisionamiento final y pre-entrega por parte del área de Proyectos, con arranques parciales y pruebas funcionales por sistemas. En este escenario, la Unidad de Mantenimiento recibe activos de manera gradual, coexistiendo equipos en servicio, equipos en pruebas y frentes aún en montaje. Este estado transitorio condiciona la gestión: las prioridades se definen por habilitación de procesos, disponibilidad de personal técnico y fechas de hitos de entrega, más que por un plan de mantenimiento.

Con el objetivo de aportar 1.500 toneladas de yodo al año, la Faena El Toco requiere una planificación de mantenimiento sólida que garantice la disponibilidad de los equipos y el logro sostenido de la producción.

Con el fin de definir y formalizar los roles y responsabilidades dentro de la Superintendencia, se incorporó una matriz RACI.

Actividades/Roles	Superintendente	Jefe de Planificación y Proyectos	Jefe de Ejecución de Mantenimiento	Planificadores	Supervisores	Mantenedores
Dirigir diálogo de desempeño N3	R	C/I	C/I	-	-	-
Realizar sincronización táctica	A/I	R	R	C/I	C/I	-
Elaborar la planificación técnica y cartera de proyectos	C/I	R	C/I	C/I	I	-
Programar recursos de mantenimiento en sistema	I	A/C	I	R	C/I	-
Gestionar el aprovisionamiento de recursos	I	A/C	I	R	I	-
Analizar el control de presupuesto y desempeño de activos	C/I	R	I	C/I	I	-
Elaborar la planificación operativa y validación	I	C/I	R	C/I	C/I	-
Programar recursos de mantenimiento en terreno	I	I	A/C	C	R	I
Ejecutar las tareas de mantenimiento	I	I	C/I	I	A/C	R
Analizar calidad de trabajo y seguridad de activos	C/I	I	R	I	C/I	-
Consolidar resultados de gestión para diálogo de desempeño N3	A/C	R	R	C/I	I	-

Leyenda	
A	Aprobador
R	Responsable
C	Consultado
I	Informado

Figura 4: Matriz RACI.

1.2.1. Propuesta de trabajo a desarrollar y metodología

Se propone realizar un plan de mantenimiento, aplicando un modelo de gestión de mantenimiento en base a focos estratégicos siguiendo las recomendaciones de la normas ISO 55000 para la gestión de activos e ISO 31000 para el análisis de riesgo en las etapas de jerarquización y diseño de los planes de mantenimiento. Como la faena es nueva y por lo tanto no existen datos históricos en los que basar el análisis, se recurrirá a métodos cualitativos y semi-cuantitativos cuando sea posible para la toma de decisiones en la gestión de los activos, además de la experiencia de la empresa en proyectos similares.

En líneas generales, la iniciativa comprende normalizar el árbol de activos y su codificación para asegurar trazabilidad, jerarquizar mediante la matriz de criticidad conforme a los riesgos de seguridad, producción, Costo del mantenimiento, flexibilidad del proceso, diseñar los planes PM/CBM por activo crítico, definiendo frecuencias, criterios de disparo y evidencias para asegurar la viabilidad logística a través de un plan de repuestos críticos, estandarizar procedimientos esenciales (arranque, detención y detención forzada), indicadores de seguimiento inicial (% cumplimiento PM, disponibilidad, MTBF, MTTR, incidencias).

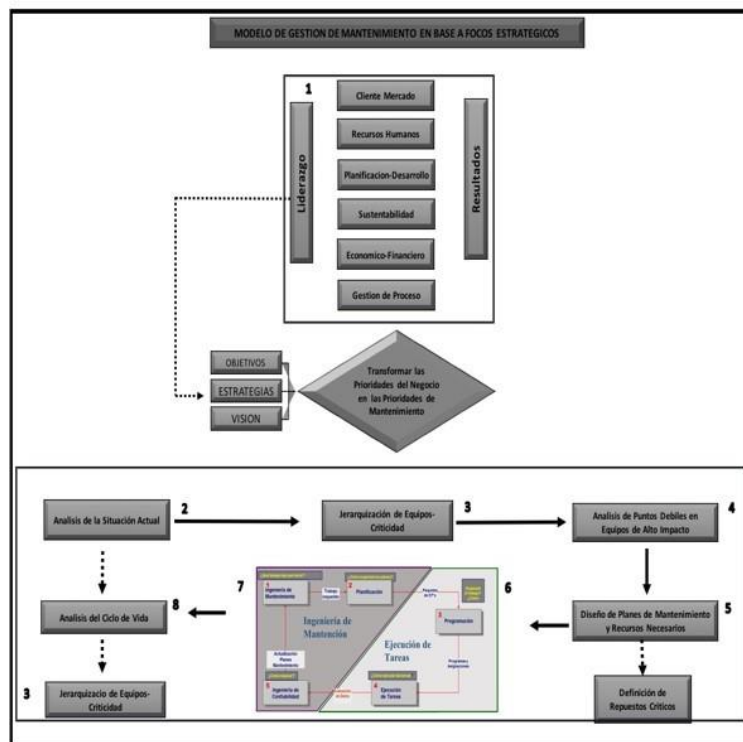


Figura 5: Modelo de gestión de mantenimiento.[5]

En general y para resumir las etapas a seguir serían las siguientes:

1. Establecer objetivos y alcances del proyecto
2. Jerarquización de equipos (Inventario + Matriz de criticidad por riesgo)
3. Análisis de modos y efectos de falla para equipos críticos
4. Diseño planes de mantenimiento
5. Establecer indicadores a medir
6. Planificación de repuestos críticos
7. Procedimientos Operativos Estándar (SOP's)

1.2.2. Carta gantt tentativa

Tarea	Entregable	Responsable	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6	SEMANA 7	SEMANA 8	SEMANA 9	SEMANA 10	SEMANA 11	SEMANA 12	SEMANA 13	SEMANA 14	SEMANA 15	SEMANA 16
Entrega de vestimenta y firma de contrato	-	RO	x															
Reconocimiento Faena y recopilación información preliminar	-	RO,ML	x															
Definición de objetivos	-	ML		x														
Inventariar Activos	Inventario de	RO		x														
Definir criterios de criticidad	Matriz de criticidad	RO,MC			x													
Entrevista mantenedores	Tabla de jerarquización	RO, Mantenedores				x												
FMEA equipos criticos	Modos y efectos de falla equipos criticos	RO					x	x										
Redacción SOP's	SOP's	RO						x	x									
Diseño planes de mantenimiento	Planes de mantención	RO								x	x							
Planificación de repuestos criticos	Planilla de repuestos	RO									x	x						
Control y seguimiento	-												x	x	x			

Figura 6: Carta gantt tentativa.

2. Explicación de la línea de impulsión

Como se mencionó en el capítulo anterior el encargo a realizar es la planificación del mantenimiento a todos los equipos de la línea de impulsión salmuera desde el toco norte hasta Pedro de Valdivia y el sistema de riego de pilas de lixiviación. En esta sección se explicará de manera general como es el funcionamiento de cada una de las subestaciones, sus equipos y configuraciones.

2.1. Descripción general

La Faena Toco considera transportar $189 \text{ [m}^3/\text{h]}$ de salmuera durante 6 horas de operación continua desde la estación Toco Norte hasta Pedro de Valdivia y a la vez se requiere alimentar la estación Toco Norte con agua a razón de $360 \text{ [m}^3/\text{h]}$, desde María Elena (Para este trabajo se considera solo la mantención del agua en Toco Sur y Toco Norte). El control del sistema se llevará a cabo desde una sala de control operada por telemetría ubicada en María Elena de esta forma se logra monitorizar en tiempo real las condiciones operativas de la línea.

El trazado total desde Toco Norte hasta Pedro de Valdivia contempla una distancia total de $61,6 \text{ [km]}$ aproximadamente, para lo cual se contemplaron 4 estaciones intermedias, Toco Sur, Poza 0, Coya Sur y Vergara.

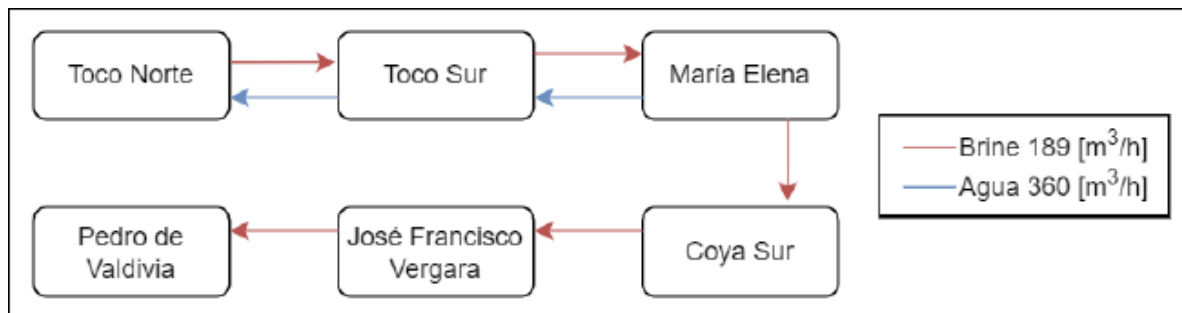


Figura 7: Diagrama de flujo simplificado.[7]

Distancia entre cada sub-estación (61.6 Km en total)

1. Toco Norte → Toco sur : 10839 [m]
2. Toco sur → Poza 0 : 14400 [m]
3. Poza 0 → Coya sur : 8846 [m]
4. Coya sur → Vergara : 6800 [m]
5. Vergara → PdV : 20765 [m]

2.2. Toco Norte

Es la subestación principal por así decirlo ya que es donde se encuentran físicamente las pilas de lixiviación y las pozas en las cuales se almacena tanto el lixiviado (salmuera) como el agua que se utiliza para el regadío.

Para el riego de las pilas se utiliza agua industrial y solución intermedia(SI) que es una mezcla de salmuera con baja concentración y agua industrial.



Figura 8: Pozas Toco Norte.

Todas las bombas que están instaladas en el centro de operaciones 1 (COP-1) del toco norte tienen una configuración de bomba autocebante + bomba centrífuga esto con el propósito de que la bomba autocebante actúe como unidad de alimentación, permitiendo una operación estable libre de condiciones de trabajo desfavorables tales como aire presente en la línea, mantener la columna hidráulica estable. De este modo, la bomba centrífuga opera en condiciones hidráulicas adecuadas, evitando fenómenos de cavitación. En total en el COP hay 5 bombas autocebantes y 10 bombas centrífugas (los detalles técnicos de estos equipos se revisarán en secciones posteriores).



Figura 9: Configuración de bombas poza del agua Toco Norte.

Los equipos que son responsabilidad de mantención son los siguientes (por motivos de espacio no se incluyen motor, vdf, etc):

Cuadro 1: Listado de equipos Toco Norte.

Equipo	Modelo	Fluido de trabajo	Cantidad	Potencia
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-8	Agua	2	18.5 [kW]
Bomba Centrífuga	Gould C Lti-3196	Agua	5	125 [HP]
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-8	SI	1	18.5 [kW]
Bomba Centrífuga	Gould C Lti-3196	SI	3	125 [HP]
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-6	Salmuera	2	37 [kW]
Bomba Centrífuga	Vogt 100-250	Salmuera	2	150 [HP]

2.3. Toco Sur

La Salmuera que es enviada desde el Toco norte es recepcionada en un estanque de 240 [m³] (TK-240) que cuenta con una poza de emergencia en caso de que los enclavamientos de las bombas fallen y exista un peligro de rebalse.



Figura 10: Configuración equipos de salmuera Toco Sur.

El agua que envía María Elena hacia el Toco sur es almacenada en una poza de agua que tiene una capacidad aproximada 12000[m³] lo cual asegura una autonomía en consumo peak de 33[hrs]



Figura 11: Configuración bombas de agua Toco Sur.

En resumen los equipos a los cuales debe realizarse la mantención en el toco sur son los siguientes:

Cuadro 2: Listado de equipos Toco Sur.

Equipo	Modelo	Fluido de trabajo	Cantidad	Potencia
Bomba Centrífuga	SIHI Nowa 12550	Agua	2	132 [kW]
Bomba Centrífuga	SIHI Nowa 4013	Agua	1	3 [kW]
Bomba Centrífuga	Vogt 80-250	Salmuera	2	125 [HP]

2.4. María Elena (Poza 0)

La salmuera enviada desde el toco sur es recepcionada y almacenada en la poza 0



Figura 12: Poza 0

A partir de esta subestación la unidad de mantenimiento no solo se hace cargo de la man-
tención de los equipos sino que también de la operación mediante telemetría de las bombas
tanto de Poza 0, Coya sur y Vergara. Los equipos a los cuales debe realizarse mantención
son los siguientes:

Cuadro 3: Listado de equipos Poza 0.

Equipo	Modelo	Fluido de trabajo	Cantidad	Potencia
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-6	Salmuera	1	37 [kW]
Bomba Centrífuga	Vogt 100-250	Salmuera	2	100 [HP]

2.5. Coya sur

La salmuera es recepcionada en un estanque de 800[m³] (Tk-800).



Figura 13: Tk 800 en reparaciones (actualmente está reparado).



Figura 14: Configuración de bombas en Coya Sur

Cuadro 4: Listado de equipos Coya sur.

Equipo	Modelo	Fluido de trabajo	Cantidad	Potencia
Bomba Centrífuga	Vogt 80-250 MDP	Salmuera	2	90 [kW]

2.6. Vergara

La estación Vergara está diseñada para impulsar la salmuera hasta Pedro de Valdivia, emplazada a 145 [m] sobre su nivel. Al considerar además las pérdidas dinámicas por fricción en el sistema, la cabeza hidráulica total requerida alcanza los 246 m.

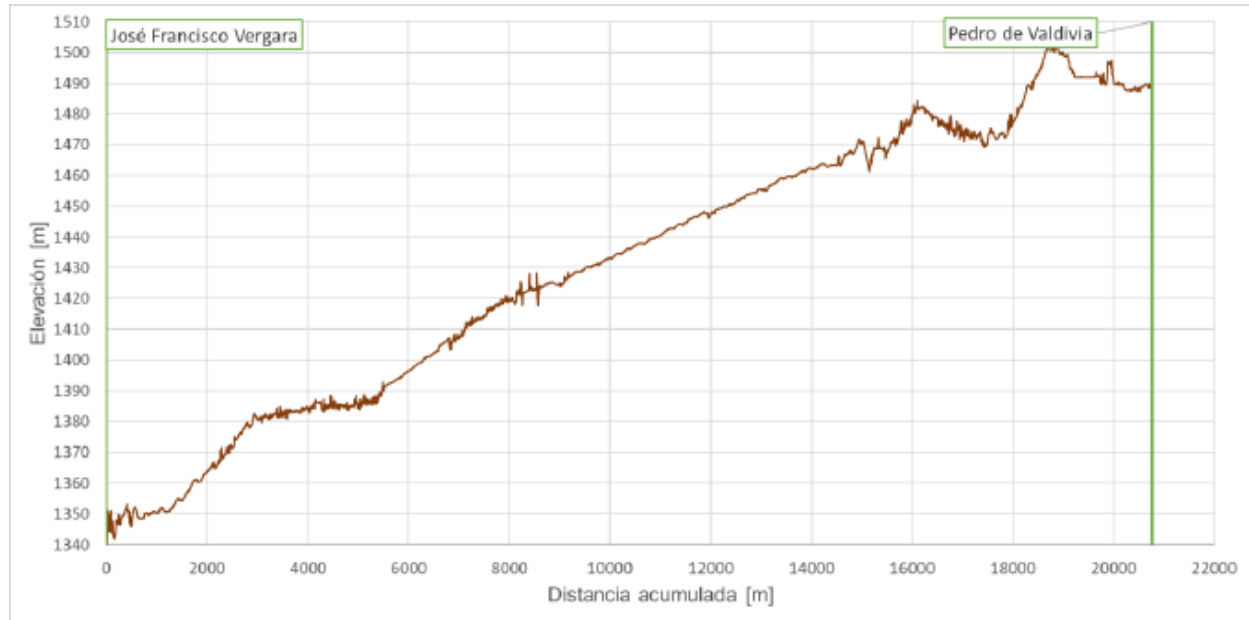


Figura 15: Perfil de elevación Vergara-Pedro de Valdivia.[10]

Para lograr esto se utilizan dos Bombas centrífugas verticales de 8 etapas las cuales están instaladas en configuración stand-by la cuales estan montadas sobre estanques conectados por rebalse

Cuadro 5: Listado de equipos Vergara

Equipo	Modelo	Fluido de trabajo	Cantidad	Potencia
Bomba Centrífuga Vertical	Johnston 16 AHC	Salmuera	1	500 [HP]
Bomba Centrífuga Vertical	VTP 15B-154/8 STG	Salmuera	1	500 [HP]



(a) Bomba vertical Vergara



(b) Poza auxiliar Vergara

2.7. Desafíos

El principal desafío de que presenta la línea de impulsión reside en lograr que el flujo de salmuera sea continuo hacia la planta PV, para ello es que se pretende utilizar la metodología antes propuesta para generar el plan de mantenimiento que permita lograr el objetivo de la faena, la cuatro primeras estaciones están dentro de la experiencia de la compañía en lo relacionado a equipos y líneas, las novedades de esta línea y nuevos desafíos serían:

- Impulsión Secuencial.
- Monitoreo en tiempo real que permita evitar derrames.
- Transporte de salmuera a lo largo de 62 [km].
- 246 [m] de cabeza hidráulica a vencer en estación Vergara con manejo de salmuera.
- Correcta programación del mantenimiento que logre consolidar la continuidad operacional.

Para efectos de este trabajo se considera todo lo relativo al mantenimiento de los equipos electromecánicos y el costo de su mantenimiento (costo de repuestos) y operación (SOP'S)

en las estaciones que correspondan.

3. Jerarquización de Equipos

La jerarquización de activos constituye una etapa fundamental en la gestión de mantenimiento, ya que permite identificar qué equipos representan mayor riesgo para la continuidad operacional, la seguridad y el desempeño del sistema completo. En la sección anterior ya se presentaron los equipos de cada sub-estación así que a modo de resumen se listan todos en el siguiente cuadro.

Cuadro 6: Listado de equipos

Equipo	Modelo	Fluido de trabajo	Cantidad	Potencia
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-8	Agua	2	18.5 [kW]
Bomba Centrífuga	Gould C Lti-3196	Agua	5	125 [HP]
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-8	SI	1	18.5 [kW]
Bomba Centrífuga	Gould C Lti-3196	SI	3	125 [HP]
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-6	Salmuera	2	37 [kW]
Bomba Centrífuga	Vogt 100-250	Salmuera	2	150 [HP]
Bomba Centrífuga	SIHI NOWA 12550	Agua	2	132[kW]
Bomba Centrífuga	SIHI NOWA 4013	Agua	1	3 [kW]
Bomba Centrífuga	Vogt 80-250	Salmuera	2	125[HP]
Bomba Centrífuga Autocebante	SIHI SPL-6	Salmuera	1	37[kW]
Bomba Centrífuga	Vogt 100-250	Salmuera	2	100 [HP]
Bomba Centrífuga Vertical	RurhPumpen VTP 15B-154	Salmuera	1	500[HP]
Bomba Centrífuga Vertical	Johnston 16 AHC	Salmuera	1	500[HP]

3.1. Identificación de riesgos

De acuerdo con la norma ISO 31000:2018, la identificación de riesgos corresponde a la etapa en la cual se reconocen, describen y estructuran los eventos que pueden afectar el logro de los objetivos del sistema, considerando su contexto operacional y las partes interesadas, de manera de disponer de una base clara para su posterior análisis, evaluación y tratamiento. En el caso del proyecto, esta etapa se enfoca en identificar los eventos que podrían impedir la continuidad del transporte e impulsión de salmuera hacia el sistema de riego de pilas, generando impactos en seguridad, ambiente, producción y costos. [3]

En términos prácticos, los riesgos identificados se expresan como escenarios de pérdida total o parcial de la función esperada de los equipos y del sistema, los cuales se manifiestan a través de fallos funcionales(revisados en profundidad en secciones posteriores) tales como:

- el equipo no cumple la función de bombeo/impulsión.
- el desempeño es inferior al estándar requerido (caudal o presión insuficiente).

- el equipo no inicia su operación (no arranca).
- Evitar derrames o rebalses(enclavamientos).

3.2. Análisis de criticidad

Debido al contexto de fase inicial no existen datos históricos con los cuales determinar analíticamente la criticidad de los equipo es por ello que se utilizara el método matriz de criticidad por riesgo (MCR) descrito en Carlos P.(2019)[2] este es un método semi-cualitativo que permite utilizar la experiencia del personal en faenas anteriores (PV y PB en este caso) para cuantificar el riesgo. El método nos dice lo siguiente:

$$Riesgo = FF * C \quad (3.1)$$

$$C = 0,4 * SHA + 0,3 * IP + 0,15 * BM + 0,15 * CM \quad (3.2)$$

Donde FF corresponde a la frecuencia de fallos y C a la consecuencia de los fallos sobre la seguridad y el medio ambiente (SHA), el impacto en la producción (IP), la baja mantenibilidad (BM) y el costo del mantenimiento (CM). El método originalmente contiene un criterio adicional para evaluar la afectación a la calidad del producto en este caso dicho criterio se elimino y se ajusto el resto de ponderaciones, esto debido a que tener la línea detenida no altera la calidad de la salmuera.

En seguida se presenta el detalle de cada criterio:

1. Frecuencia de fallos (FF)

- 1 : Infrecuente
- 2 : Relativamente Infrecuente
- 3 : Moderado
- 4 : Frecuente
- 5 : Muy frecuente

2. Salud, Seguridad, Medio ambiente,(SHA)

- 1 : No hay riesgo de lesión o derrame
- 3 : Riesgo de lesiones leves, derrame moderado
- 5 : Riesgo de lesiones graves o mortales , derrame severo

3. Impacto en la Producción (IP)

- 1 : Pérdidas menores al 10 %

- 2 : Pérdidas entre el 10 % y el 24 %
- 3 : Pérdidas entre el 25 % y el 49 %
- 4 : Pérdidas entre el 50 % y el 74 %
- 5 : Pérdidas mayores al 75 %

4. Baja Mantenibilidad (BM)

- 1 : Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación cortos y rápida logística
- 3 : Se cuenta con unidades de reserva que logran cumplir de forma parcial el impacto en la producción, tiempos de reparación y logística intermedios
- 5 : No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción; tiempos de reparación y logística muy grandes

5. Costo del Mantenimiento (CM)

- 1 : Costo de reparación menores al 10 % del costo del equipo
- 2 : Costo de reparación entre el 10 % y el 24 % del costo del equipo
- 3 : Costo de reparación entre el 25 % y el 49 % del costo del equipo
- 4 : Costo de reparación entre el 50 % y el 74 % del costo del equipo
- 5 : Costo de reparación mayores al 75 % del costo del equipo

Para la obtención de los puntajes se realizó un trabajo de campo basado en entrevistas presenciales con operadores, mantenedores y personal de prevención de riesgos de las plantas PB y PV. Con los valores obtenidos se calculó el puntaje de consecuencia (C) y, en conjunto con el puntaje de frecuencia de falla (FF), se posicionaron los activos en la matriz de criticidad, la cual se encuentra segmentada en cuatro regiones según su nivel de riesgo.

- MA: Muy Alta Criticidad
- A: Alta Criticidad
- M: Media Criticidad
- B: Baja Criticidad

MATRIZ SQM		CONSECUENCIA				
		1	2	3	4	5
FRECUENCIA	5	M	A	MA	MA	MA
	4	B	A	A	MA	MA
	3	B	M	A	MA	MA
	2	B	B	M	A	MA
	1	B	B	B	A	MA

Figura 17: Matriz de criticidad SQM.

Como resultado del anterior análisis se obtuvo lo siguientes:

JERARQUIZACIÓN DE EQUIPOS										
TAG	EQUIPO	FABRICANTE	SISTEMA	FF	SHA	IP	BM	CM	CONSECUEN CIA	CRITICIDAD
BBA-111	Bomba centrífuga autocebante POZA AGUA TN	SIHI	RIEGO PILAS	3	2	1	3	2	2	M
BBA-112	Bomba centrífuga autocebante POZA AGUA TN (Stand-by)	SIHI	RIEGO PILAS	3	1	2	3	2	2	M
BBA-113	Bomba centrífuga POZA AGUA TN	Gould Pumps	RIEGO PILAS	3	1	2	1	4	2	M
BBA-114	Bomba centrífuga POZA AGUA TN	Gould Pumps	RIEGO PILAS	3	2	2	1	3	2	M
BBA-115	Bomba centrífuga POZA AGUA TN	Gould Pumps	RIEGO PILAS	3	2	2	1	3	2	M
BBA-116	Bomba centrífuga POZA AGUA TN	Gould Pumps	RIEGO PILAS	3	2	2	1	3	2	M
BBA-117	Bomba centrífuga POZA AGUA TN (Stand-by)	Gould Pumps	RIEGO PILAS	2	2	2	1	3	2	B
BBA-118	Bomba centrífuga autocebante POZA SI TN	SIHI	RIEGO PILAS	3	2	1	3	3	2	M
BBA-119	Bomba centrífuga SI TN	Gould Pumps	RIEGO PILAS	3	2	2	1	3	2	M
BBA-120	Bomba centrífuga SI TN	Gould Pumps	RIEGO PILAS	3	2	2	1	3	2	M
BBA-121	Bomba centrífuga SI TN (stand-by)	Gould Pumps	RIEGO PILAS	2	1	2	3	3	2	B
BBA-020	Bomba centrífuga autocebante BRINE TN	SIHI	PORTEO DE BRINE	4	2	4	3	2	3	A
BBA-021	Bomba centrífuga autocebante BRINE TN (stand-by)	SIHI	PORTEO DE BRINE	3	1	2	3	2	2	M
BBA-022	Bomba centrífuga BRINE TN	Vogt	PORTEO DE BRINE	4	2	3	3	4	3	A
BBA-023	Bomba centrífuga BRINE TN (stand-by)	Vogt	PORTEO DE BRINE	3	1	3	3	4	3	M
BBA-007	Bomba centrífuga AGUA TS	SIHI	RIEGO PILAS	3	2	2	3	3	3	M
BBA-008	Bomba centrífuga AGUA TS(stand-by)	SIHI	RIEGO PILAS	2	2	1	2	3	2	B
-	Bomba centrífuga CACHIMBA TS	SIHI	RIEGO PILAS	2	1	1	1	2	2	B
BBA-004	Bomba centrífuga BRINE TS	Vogt	PORTEO DE BRINE	4	3	4	3	4	3	A
BBA-005	Bomba centrífuga BRINE TS(stand-by)	Vogt	PORTEO DE BRINE	4	2	1	3	4	3	A
BBA-009	Bomba centrífuga autocebante POZA 0	SIHI	PORTEO DE BRINE	4	3	4	1	2	3	A
BBA-010	Bomba Centrífuga POZA 0	Vogt	PORTEO DE BRINE	4	2	4	3	3	3	A
BBA-011	Bomba Centrífuga POZA 0 (stand-by)	Vogt	PORTEO DE BRINE	3	2	3	3	4	3	A
BBA-014	Bomba Centrífuga CS	Vogt	PORTEO DE BRINE	3	2	3	3	4	3	A
BBA-015	Bomba Centrífuga CS (stand-by)	Vogt	PORTEO DE BRINE	3	2	3	3	4	3	A
BBA-018	Bomba centrífuga multietapa vertical VERGARA	RuhrPumpen	PORTEO DE BRINE	4	5	5	5	5	5	MA
BBA-019	Bomba centrífuga multietapa vertical VERGARA (stand-by)	Johnston	PORTEO DE BRINE	4	5	5	5	5	5	MA

Figura 18: Jerarquización de Equipos.

En función de los resultados obtenidos, los activos clasificados en las categorías A y MA son aquellos que concentran el mayor nivel de riesgo operacional. Por lo tanto, los siguientes capítulos se centrarán en el análisis detallado de estos equipos, desarrollando para ellos las estrategias de mantenimiento más adecuadas.

4. AMFE equipos críticos

El Análisis de los Modos y Efectos de fallas (FMEA en inglés) es la principal herramienta del RCM para optimizar la gestión del mantenimiento, El AMFE es un método sistemático que permite identificar los problemas antes de que ocurran y puedan afectar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado. Para cumplir con ese objetivo el análisis debe ocurrir en el siguiente orden:

1. Definir las funciones de los activos y sus respectivos estándares de operación.
2. Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo.
3. Definir los modos de fallo asociados a cada fallo funcional.
4. Establecer los efectos y consecuencias asociados a cada modo de fallo.

Del análisis de criticidad se obtuvo que los equipos a analizar en profundidad son los siguientes:

Cuadro 7: Listado Equipos Críticos.

TAG	Nombre	Equipo	Nº	Criticidad
BBA-020	Bomba autocebante Salmuera Toco norte	SIHI SPL-6	1	A
BBA-022	Bomba Salmuera Toco Norte	Vogt 100-250	2	A
BBA-004	Bomba Salmuera Toco Sur	Vogt 80-250	3	A
BBA-009	Bomba autocebante Poza 0	SIHI SPL-6	4	A
BBA-010	Bomba Poza 0	Vogt 100-250	5	A
BBA-014	Bomba CS	Vogt 80-250	6	A
BBA-018	Bomba Vergara 1	RuhrPumpen VTP 15B-154	7	MA
BBA-019	Bomba Vergara 2	Johnston AHC 16	8	MA

4.1. Funciones de los activos

Los activos analizados en este capítulo corresponden en su totalidad a bombas centrífugas críticas, las cuales cumplen un rol esencial en la continuidad operacional del proceso productivo de yodo. La función principal de estos equipos es impulsar salmuera desde las distintas estaciones intermedias hasta la planta Pedro de Valdivia, asegurando el caudal, la presión y la disponibilidad requeridas por el proceso aguas abajo.

Desde el punto de vista funcional, las bombas deben ser capaces de operar de manera continua bajo condiciones severas de servicio, caracterizadas por grandes distancias de impulsión, elevadas cabezas hidráulicas especialmente en la estación Vergara y un fluido de trabajo altamente corrosivo. En el Cuadro 6. de los activos críticos se pueden reconocer 3 tipos de bombas, bomba centrífuga, bomba centrífuga autocebante y bomba centrífuga vertical de 8 , cuyas funciones serían las siguientes:

- Bombas centrífugas autocebantes: Alimentar con 189 [m^3/h] de salmuera a las bombas centrífugas
- Bombas centrífugas: Bombear 189 [m^3/h] de salmuera a 10 [bar]
- Bombas centrífugas verticales: Bombear 189 [m^3/h] de salmuera a 25 [bar]

4.2. Fallas funcionales

Ya definida la función principal de los activos se procede a determinar en que formas dichos activos dejan de cumplir su función esperada.

Un fallo funcional se define como un evento no previsible que impide que un activo cumpla la función para la cual fue diseñado, dentro del contexto operacional en el que se desempeña [1]

Los fallos funcionales pueden afectar una función de manera total o parcial. La pérdida total de la función se presenta cuando el activo se detiene completamente de forma inesperada, imposibilitando la continuidad del proceso asociado. Por su parte, la pérdida parcial de la función ocurre cuando el activo continúa operando, pero no es capaz de alcanzar el estándar de desempeño esperado, ya sea debido a una disminución de eficiencia, una reducción en su capacidad operativa o una operación fuera de los límites de tolerancia definidos para el proceso.

Teniendo en cuenta las funciones definidas en el punto 4.1 se identifican las siguientes fallas funcionales.

1. Bombas autocebantes
 - a) No bombea solución
 - b) Caudal insuficiente
 - c) Perdida de cebado
 - d) No arranca
2. Bombas centrífugas
 - a) No bombea solución
 - b) Caudal insuficiente
 - c) No arranca
3. Bombas verticales
 - a) No bombea solución
 - b) Caudal insuficiente

c) No arranca

4.3. Modos de fallas

Un modo de falla se define como el evento físico específico que provoca que un activo experimente un fallo funcional, es decir, la manera concreta en que ocurre la falla [1]. Mientras que el fallo funcional describe qué función deja de cumplirse, el modo de falla explica cómo y por qué se produce dicha pérdida de funcionalidad. La correcta identificación de los modos de falla resulta fundamental dentro del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMFE), ya que constituye la base para la evaluación de consecuencias y la posterior definición de estrategias de mantenimiento adecuadas.

Con el objetivo de evitar redundancias en el análisis y facilitar la comprensión de los mecanismos de falla, se ha decidido utilizar las bombas autocebantes como equipo representativo para la identificación y descripción detallada de los modos de falla. Esta selección se justifica en que este tipo de bomba incorpora tanto componentes hidráulicos como mecánicos adicionales en particular el sistema de cebado que concentran un número significativo de modos de falla relevantes, muchos de los cuales son extrapolables a las demás familias de bombas analizadas.

Cuadro 8: AMFE – Bombas autocebantes: fallos funcionales y modos de falla

N°	EQUIPOS	FUNCIÓN ESPERADA	FALLO FUNCIONAL	MODOS DE FALLA
1	Bombas autocebante	1. Alimentar con 189 [m ³ /h] de salmuera a bomba centrífugas	1.a.1 No bombea solución	1.a.1.1 Falla en Conjunto rotativo 1.a.1.2 Falla/Rotura de sello mecánico 1.a.1.3 Correas rotas 1.a.1.4 Falla en sistema de lubricación 1.a.1.5 Obstrucción o fuga en línea de succión 1.a.1.6 Falla en valvula check interna 1.a.1.7 Motor eléctrico no alcanza RPM suficientes
			1.a.2 Caudal insuficiente	1.a.2.1 Desgaste Conjunto rotativo 1.a.2.2 Falla en sello mecánico 1.a.2.3 Correas sueltas/desalineadas 1.a.2.5 Falla en columna de succión 1.a.2.6 Cavitación 1.a.2.7 Motor eléctrico no alcanza RPM suficientes
			1.a.3 Perdida de cebado	1.a.3.1 Falla valvula check interna 1.a.3.2 Aire en columna de succión
			1.a.4 No arranca	1.a.4.1 Salamiento de la bomba 1.a.4.2 Motor eléctrico fuera de servicio 1.a.4.3 Fallo en sensor de nivel poza

Es importante mencionar que se converso con el personal de mantención para establecer los modos de fallas más probables o comunes que ellos han experimentado, existen una gran cantidad de modos de fallas para los fallos funcionales que se listaron ej. Perdida de cebado un modo de falla podría ser "cuerpo de bomba presenta rotura" sin embargo no es común que ocurra y cuando ocurre se debe a alguna situación particular y son otras la herramientas utilizadas para llegar a la causa raíz del problema.

4.4. Efectos y consecuencias de las fallas

Los efectos de falla describen lo que ocurre en el activo y en el sistema inmediatamente después de que se manifiesta un modo de falla, es decir, las señales, comportamientos y degradaciones observables que se generan como resultado directo del evento. En el contexto del AMFE, esta etapa permite vincular de manera lógica el modo de falla con sus impactos operacionales.

Para determinar las consecuencias de los modos de falla se seguirá el siguiente diagrama de decisión:

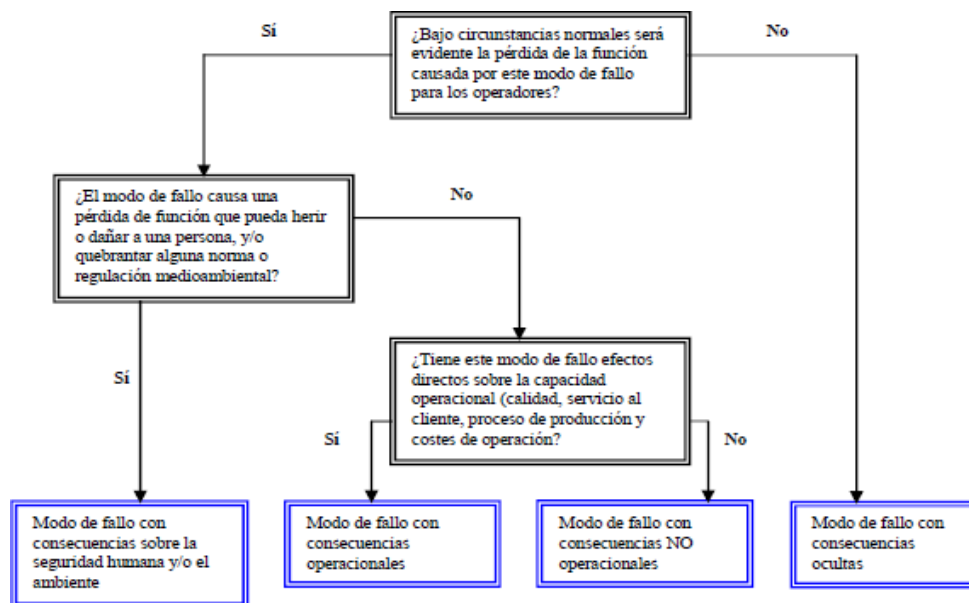


Figura 19: Diagrama decisión de consecuencias.[1]

y de igual forma que en la sección anterior se escogerá al caso de las bombas autocebantes como ejemplo:

Cuadro 9: Bombas autocebantes: modos de falla y efectos de la falla

BOMBAS AUTOCEBANTES: Función principal alimentar 189 (m³/h) a línea de salmuera		
FALLO FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA
1.a.1 No bombea solución	1.a.1.1 Rotura en conjunto rotativo	Giro deficiente o detenido; la bomba no impulsa solución aunque exista succión previa
	1.a.1.2 Falla/Rotura de sello mecánico	Ingreso de aire; pérdida de caudal; daño a elementos mecánicos; vibración
	1.a.1.3 Correa rota	No hay transmisión de movimiento
	1.a.1.4 Fallo en sistema de lubricación	Sobrecalentamiento del sistema; daño a elementos mecánicos
	1.a.1.5 Obstrucción o fuga en línea de succión	Obstrucción o fuga impide que la bomba genere el vacío necesario
	1.a.1.6 Falla en válvula check interna	Pérdida de cebado
	1.a.1.7 Motor eléctrico no alcanza las RPM suficientes	No hay transmisión de movimiento
1.a.2 Caudal insuficiente	1.a.2.1 Desgaste de conjunto rotativo	Equipo no logra la velocidad de giro necesaria; daño a elementos mecánicos
	1.a.2.2 Falla en sello mecánico	Fuga parcial reduce presión, generando variación en el caudal entregado; desgaste de elementos mecánicos
	1.a.2.3 Correa suelta/desalineada	Transmisión de potencia ineficiente; vibraciones; daño a elementos mecánicos
	1.a.2.5 Falla en columna de succión	Fuga impide que la bomba genere el vacío necesario
	1.a.2.6 Cavitación	Vibraciones; daño a elementos mecánicos
	1.a.2.7 Motor eléctrico no alcanza RPM suficientes	Baja presión; operación inestable; mayor consumo eléctrico
	1.a.3 Pérdida de cebado	1.a.3.1 Falla válvula check interna
1.a.3.2 Aire en columna de succión		Ingreso de aire; cavitación
1.a.4 No arranca	1.a.4.1 Salamiento de la bomba	Bloqueo de rotor; posible rotura de eje
	1.a.4.2 Fallo en motor eléctrico	No hay transmisión de movimiento
	1.a.4.3 Fallo en sensor de nivel poza	Por enclavamiento, el sistema de control detiene la bomba

4.5. Presentación de resultados AMFE

Repitiendo el mismo proceso se llega a las mismas tablas para las bombas centrífugas y verticales

4.5.1. AMFE Bombas centrífugas

Cuadro 10: AMFE Bombas centrífugas

Bombas centrífugas: Función principal bombear 189 [m³/h] a 10 [bar]		
FALLO FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA
2.a.1 No bombea solución	2.a.1.1 Rotura de sello mecánico	Ingreso de aire; pérdida de caudal; daño a elementos mecánicos; vibración
	2.a.1.2 Acoplamiento roto	No hay transmisión de movimiento
	2.a.1.3 Falla en sistema de lubricación	Daño y desgaste acelerado de los elementos mecánicos
	2.a.1.4 Sentido de giro invertido	No se genera el caudal necesario
	2.a.1.5 Rotura en conjunto rotativo	Giro deficiente o detenido; la bomba no impulsa solución aunque exista succión previa
	2.a.1.6 Fallo de motor eléctrico	No hay transmisión de movimiento
	2.a.1.7 Fallo de VDF	Sin señal desde el variador, el motor queda fuera de control o no arranca
	2.a.1.8 Fallo en válvula de control	Válvula de control bloqueada impide el flujo
2.a.2 Caudal insuficiente	2.a.2.1 Falla de sello mecánico	Ingreso de aire; pérdida de caudal; daño a elementos mecánicos; vibración
	2.a.2.2 Acoplamiento desalineado	Transmisión de potencia ineficiente; vibración; daño a elementos mecánicos
	2.a.2.3 Falla en sistema de lubricación	Daño y desgaste acelerado de los elementos mecánicos
	2.a.2.4 Desgaste en conjunto rotativo	Equipo no logra la velocidad de giro necesaria; daño a elementos mecánicos
	2.a.2.5 Motor eléctrico no alcanza las RPM necesarias	No hay transmisión de movimiento
	2.a.2.6 Fallo de VDF	Sin señal desde el variador, el motor queda fuera de control o no arranca
	2.a.2.7 Salamiento de bomba	Bloqueo de rotor; posible rotura de eje
2.a.3 No arranca	2.a.3.1 Motor eléctrico fuera de servicio	No hay transmisión de movimiento
	2.a.3.2 Fallo en sensor de nivel poza	Por enclavamiento, la bomba no arranca al no detectarse nivel
	2.a.3.3 Disparo de protecciones (VDF)	Sin señal desde el variador, el motor no arranca

4.5.2. AMFE Bombas verticales

Cuadro 11: AMFE Bombas verticales

Bombas verticales: Función principal bombear 189 [m³/h] de salmuera a 25 [bar]		
Fallo funcional	Modos de falla	Efectos de la falla
3.a.1 No bombea	3.a.1.1 Rotura de empaquetadura	Ingreso de aire; pérdida de caudal; daño a elementos mecánicos; vibración
	3.a.1.2 Desalineación de eje	Vibración y daño en rodamientos
	3.a.1.3 Fallo en motor eléctrico	No hay transmisión de movimiento
	3.a.1.4 Fallo en VDF / señal	Fuera de control; el motor no arranca
	3.a.1.5 Válvula de descarga cerrada	Sobrecalentamiento; daño a elementos mecánicos
	3.a.1.6 Bloqueo en succión	Pérdida de flujo
	3.a.1.7 Desgaste de etapas/rotativo	No logra velocidad ni presión
	3.a.1.8 Fallo de flujómetro	Señal incorrecta y ajuste errado del VDF
3.a.2 Caudal insuficiente	3.a.2.1 Rotura de empaquetadura	Ingreso de aire; pérdida de caudal; daño a elementos mecánicos; vibración
	3.a.2.2 Desalineación de eje	Vibración y daño en rodamientos
	3.a.2.3 Motor eléctrico no alcanza las RPM necesarias	Baja presión; operación inestable; mayor consumo eléctrico
	3.a.2.4 Fallo en VDF / señal	Fuera de control; el motor no arranca
	3.a.2.5 Desgaste de etapas/rotativo	Se pierde eficiencia, además de perder caudal y presión
	3.a.2.6 Incrustación salina	Aumento de consumo eléctrico; menor caudal
	3.a.2.7 Fallo de flujómetro	Señal incorrecta y apaga el sistema por enclavamiento
3.a.3 No arranca	3.a.3.1 Motor eléctrico fuera de servicio	No hay transmisión de movimiento
	3.a.3.2 Fallo de tablero/protección	Protección evita arranque
	3.a.3.3 Bomba de refrigeración fuera de servicio	Se quema el motor eléctrico debido a sobrecalentamiento.
	3.a.3.4 Fallo de sensor de nivel	Bomba no arranca por enclavamiento
	3.a.3.5 Disparo de protecciones/alarmas (VDF)	Motor queda en 0 Hz

5. Plan de mantenimiento

En el capítulo anterior se contestaron las primera 5 preguntas que el método RCM propone , ahora lo que sigue es responder las 2 ultimas

- 6. ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir cada falla?
- 7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

El responder estas preguntas nos ayudara a determinar que tarea de mantenimiento es la más adecuado para cada modo de falla , para llegar a la definición de las tareas nos apoyaremos en el árbol lógico de decisión RCM, una vez definido el tipo de actividad de mantenimiento mediante el árbol lógico de decisión, se procede a establecer la acción de mantenimiento específica asociada, junto con su respectiva frecuencia de ejecución. Este proceso se desarrolla considerando que uno de los objetivos principales del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) es evitar, o en su defecto poder reducir, las consecuencias que la ocurrencia de fallas puede generar sobre la seguridad de las personas, el medio ambiente y la continuidad operacional.

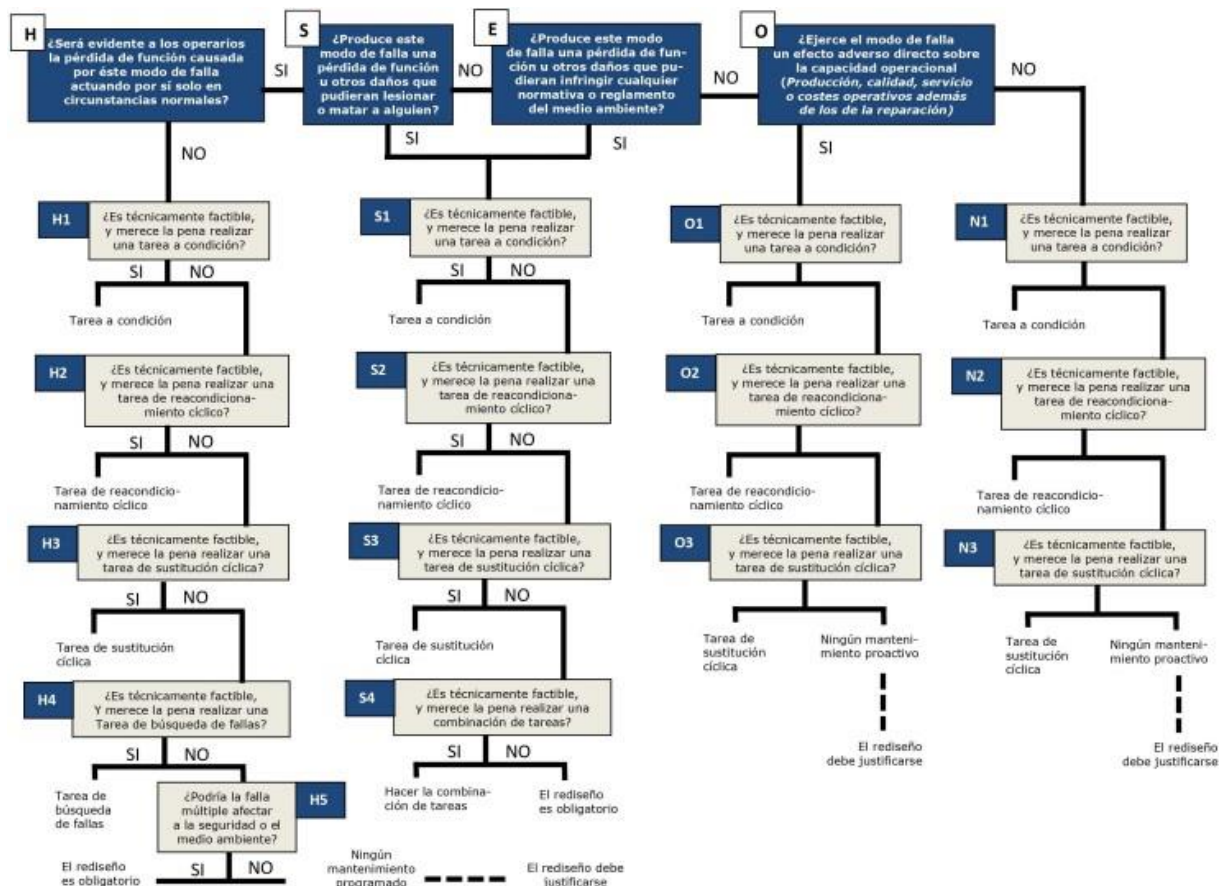


Figura 20: Lógica de decisión RCM.[1]

El RCM clasifica las actividades de mantención en dos grupos las tareas preventivas (proactivas) y las tareas correctivas estas últimas son llevadas a cabo únicamente cuando no se logra hallar una tarea proactiva adecuada, cada grupo de tarea tiene diferentes tipos de actividades de mantenimiento que se detallan a continuación:

■

Tareas proactivas

Tareas a condición: Este tipo de tareas se basa en el principio de que la mayoría de los modos de falla no ocurren de un instante a otro sino que responden a un deterioro natural en el tiempo y es posible prever una falla total si se realiza un monitoreo de condiciones a través de herramientas de ensayo no destructivo (NDT) como lo pueden ser termografías, medición de vibraciones, análisis de aceites, etc.

- Tareas de reacondicionamiento: Son actividades periódicas que se llevan a cabo para restaurar un activo a su condición original un ejemplo de esta práctica serían los overhauls.
- Tareas de sustitución programadas: Este tipo de actividad está orientada específicamente hacia el reemplazo de componentes o partes usadas de un activo a un intervalo temporal inferior al de su vida útil.
- Tareas de búsqueda de fallas: los modos de fallos ocultos no son evidentes bajo condiciones normales de operación, por lo que este tipo de fallos no tienen consecuencias directas, pero éstas consecuencias pueden propiciar la aparición de fallos múltiples dentro de un contexto operacional.[2]

Tareas correctivas (Reactivas)

- Rediseño: En el caso de no conseguir ningún tipo de actividad preventiva que ayude a reducir la posibilidad de ocurrencia de los modos de fallos que afecten a la seguridad o al ambiente a un nivel aceptable, es necesario desarrollar un rediseño o una modificación (de la estrategia de mantenimiento o del modo de fallo) que permita minimizar o eliminar las consecuencias de esos modos de fallos.[2]
- Actividades de mantenimiento no programado: En el caso de no conseguir actividades de prevención económicamente más baratas que los posibles efectos derivados de los modos de fallos con consecuencias operacionales o no operacionales, se podrá tomar la decisión de esperar que ocurra el fallo y actuar de forma reactiva.[2]

5.1. Definición de tareas de mantenimiento

Ya con los tipos de actividades de mantenimiento propuestos se deben seleccionar un tipo de actividad que permita evitar o corregir los modos de fallas identificados en el AMFE, estas pueden ser inspecciones, calibraciones, mediciones, reemplazos etc., Para la elección de las tareas adecuadas y su frecuencia de realización se utilizó la experiencia del personal de mantenimiento y operación en otras faenas debido a la similitud de los equipos y la solución con la que trabajan.

Una vez decidida la actividad adecuada se establece el responsable y los criterios que deben disparar una acción sobre el equipo, se presentará el caso ejemplo de las bombas autocebantes y luego los resultados para los otros tipos de bombas.

Del AMFE rescatamos que el modo de falla 1.a.1.1 corresponde a una rotura en el conjunto rotativo entonces siguiendo la lógica RCM

1. P: ¿Será evidente a los operarios la pérdida de función causada por este modo de falla actuando por sí solo en circunstancias normales? R: SI
2. P: ¿Produce este modo de falla una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien? R: NO
3. P: ¿Produce este modo de falla una pérdida de función u otros daños que pudieran infringir cualquier normativa o reglamento del medio ambiente? R:NO
4. P: ¿Ejerce el modo de falla un efecto adverso directo sobre la capacidad operacional? R: SI
5. P: ¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea a condición? R: SI, merece la pena realizar tareas a condición debido a que es posible prever la falla mediante mediciones de vibración y temperatura semanalmente
6. P: ¿Es técnicamente factible y merece la pena una tarea de reacondicionamiento cíclico? R: SI, debido a la operación de los equipos es posible realizar inspecciones cuando el equipo se encuentre detenido y revisar las holguras, el rodete y los rodamientos.

De esta forma encontramos la estrategia de mantenimiento para el resto de los modos de falla los resultados de dicho análisis se presentan en forma de tablas.

Cuadro 12: Estrategia de mantenimiento bombas autocebantes

FALLO FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO
1.a.1 No bombea solución	1.a.1.1 Rotura en Conjunto rotativo	Conjunto rotativo ->Tipo: a condición + preventivo cíclico Tareas: Temperatura y vibración semanal; Inspección en detención de equipo (Holguras, Impulsor, Rodamientos) Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5%).
	1.a.1.2 Falla/Rotura de sello mecánico	Sello mecánicos ->Tipo: a condición Tareas: Inspección por turno; Temperatura y vibraciones semanal Responsable: Mecánico Criterio de detención: Fuga continua o aumento Temp (+10 °C) o Vibración (25 %).
	1.a.1.3 Correas rotas	Correas ->Tipo: Correctivo Tareas: Cambiar correas Responsable: Mecánico.
	1.a.1.4 Falla en sistema de lubricación	Lubricación ->Tipo: A condición Tareas: Checkear nivel mensual; Cambio de aceite/grasa semestral Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Aceite/grasa sucios, presencia de metal, temperatura elevada.
	1.a.1.5 Obstrucción o fuga en línea de succión	Aire en columna de succión ->Tipo: Preventivo Tareas: Prueba de estanqueidad y retorqueo en bridas cada 1 mes Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Burbujeo, vibración irregular y pérdida de cebado.
	1.a.1.6 Falla en válvula check interna	Check interna ->Tipo: a condición + preventivo Tareas: Prueba de retención mensual en operación y kit de chequeo trimestral en detención Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Pérdida de cebado, asiento marcado, tapa pegada.
	1.a.1.7 Motor eléctrico fuera de servicio	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual; firma eléctrica trimestral; aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
1.a.2 Caudal insuficiente	1.a.2.1 Desgaste Conjunto rotativo	Conjunto rotativo ->Tipo: preventivo cíclico Tareas: Inspección en detención de equipo (Holguras, Impulsor, Rodamientos) Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5%).
	1.a.2.2 Falla en sello mecánico	Sello mecánicos ->Tipo: a condición Tareas: Inspección por turno; Temperatura y vibraciones semanal Responsable: Mecánico Criterio de detención: Fuga continua o aumento Temp (+10 °C) o Vibración (25 %).
	1.a.2.3 Correas sueltas/desalineadas	Correas ->Tipo: Correctivo Tareas: Ajustar o alinear correas según corresponda Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Ruedo elevado, vibración evidente.
	1.a.2.3 Rodete incrustado	Incrustación ->Tipo: a condición Tareas: Lavado con agua caliente Responsable: Operaciones.
	1.a.2.4 Falla en columna de succión	Succión ->Tipo: a condición Tareas: Inspección visual de bridas y uniones Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Fuga evidente.
	1.a.2.5 Cavitación	Cavitación ->Tipo: Predictivo Tareas: Limpiar canastillo de succión; inspeccionar nivel en poza; revisar fugas de aire en bridas Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Sonido tipo "grava", vibración elevada y pérdida de caudal.
	1.a.2.6 Falla motor eléctrico	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual; firma eléctrica trimestral; aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
1.a.3 Pérdida de cebado	1.a.3.1 Falla válvula check interna	Check interna ->Tipo: a condición + preventivo Tareas: Prueba de retención mensual en operación y kit de chequeo trimestral en detención Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Pérdida de cebado, asiento marcado, tapa pegada.
	1.a.3.2 Aire en columna de succión	Aire en columna de succión ->Tipo: Preventivo Tareas: Prueba de estanqueidad y retorqueo en bridas cada 1 mes Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Burbujeo, vibración irregular y pérdida de cebado.
1.a.4 No arranca	1.a.4.1 Salamiento de la bomba	Salamiento ->Tipo: búsqueda de falla Tareas: Checkear giro libre del eje antes de poner en marcha el equipo si estuvo detenido mucho tiempo Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Eje bloqueado.
	1.a.4.2 Fallo en motor eléctrico	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual; firma eléctrica trimestral; aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
	1.a.4.3 Fallo en sensor de nivel poza	Fallo de sensor de nivel de poza ->Tipo: Preventivo Tareas: Verificación de señal, calibración del sensor y limpieza de electrodos mensual Responsable: Instrumentista Criterio de intervención: Lectura errática, bloqueo de arranque de bomba.

del mismo modo se repite el proceso para los otros tipos de bombas.

Cuadro 13: Estrategia de mantenimiento bombas centrífugas

FALLO FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO
2.a.1 No bombea solución	2.a.1.1 Rotura de sello mecánico	Sello mecánicos ->Tipo: a condición Tareas: inspección por turno; Temperatura y vibraciones semanal Responsable: Mecánico Criterio de detención: Fuga continua o aumento Temp (+10 °C) o Vibración (25 %).
	2.a.1.2 Acoplamiento roto	Acoplamiento ->Tipo: a condición + preventivo Tareas: vibraciones semanal; alineamiento láser trimestral y post intervención Responsable: Mecánico Criterios de intervención: evidencia visual, patrón de vibración, ruido excesivo.
	2.a.1.3 Falla en sistema de lubricación	Lubricación ->Tipo: A condición Tareas: Checkear nivel mensual; Cambio de aceite/grasa semestral Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Aceite/grasa sucios, metal, temperatura elevada.
	2.a.1.4 Sentido de giro inverso	Sentido de giro ->Tipo: Búsqueda de fallas Tareas: probar sentido de giro luego de alguna intervención al motor o al VDF Responsable: Eléctrico Criterios de intervención: Giro invertido evidente.
	2.a.1.3 Rotura en conjunto rotativo	Conjunto rotativo ->Tipo: preventivo cíclico Tareas: Inspección en detención de equipo (Holguras, Impulsor, Rodamientos) Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5 %).
	2.a.1.4 Fallo de motor eléctrico	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual, firma eléctrica trimestral, aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
	2.a.1.5 Fallo de VDF	VDF ->Tipo: a condición Tareas: revisar logs, velocidad ordenada vs real semanal; limpieza y ventilación mensual; respaldo de parámetros trimestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: No arranca, alarmas repetidas; velocidad irregular/sin presión.
2.a.1.6 Fallo en válvula de control	Válvula hidráulica ->Tipo: a condición Tareas: Inspección visual diaria; Checkear nivel mensual; Cambio de aceite semestral Responsable: Mecánico Criterio de intervención: cuchilla “pegada”, fuga de aceite.	
2.a.2 Caudal insuficiente	2.a.2.1 Falla de sello mecánico	Sello mecánicos ->Tipo: a condición Tareas: inspección por turno; Temperatura y vibraciones semanal Responsable: Mecánico Criterio de detención: Fuga continua o aumento Temp (+10 °C) o Vibración (25 %).
	2.a.2.2 Acoplamiento desalineado	Acoplamiento ->Tipo: a condición + preventivo Tareas: vibraciones semanal; alineamiento láser trimestral y post intervención Responsable: Mecánico Criterios de intervención: patrón de vibración, ruido excesivo.
	2.a.2.3 Fallo sistema de lubricación	Lubricación ->Tipo: A condición Tareas: Checkear nivel mensual; Cambio de aceite/grasa semestral Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Aceite/grasa sucios, metal, temperatura elevada.
	2.a.2.4 Incrustación	Rodete incrustado ->Tipo: a condición Tareas: Lavado con agua caliente Responsable: Operaciones.
	2.a.2.5 Desgaste en conjunto rotativo	Conjunto rotativo ->Tipo: preventivo cíclico Tareas: Inspección en detención de equipo (Holguras, Impulsor, Rodamientos) Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5 %).
	2.a.2.4 Fallo de motor eléctrico	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual, firma eléctrica trimestral, aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
	2.a.2.5 Fallo de VDF	VDF ->Tipo: a condición Tareas: revisar logs, velocidad ordenada vs real semanal; limpieza y ventilación mensual; respaldo de parámetros trimestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: No arranca, alarmas repetidas; velocidad irregular/sin presión.
2.a.2.6 Fallo en válvula de control	Válvula hidráulica ->Tipo: a condición Tareas: Inspección semanal; Checkear nivel mensual; Cambio de aceite semestral Responsable: Mecánico Criterio de intervención: cuchilla “pegada”, fuga de aceite.	
2.a.3 No arranca	2.a.3.1 Salamiento de bomba	Salamiento ->Tipo: búsqueda de falla Tareas: checkear giro libre del eje antes de poner en marcha el equipo si estuvo detenido Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Eje bloqueado.
	2.a.3.2 Fallo motor eléctrico	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual, firma eléctrica trimestral, aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
	2.a.3.3 Fallo en sensor de nivel poza	Fallo de sensor de nivel de poza ->Tipo: Preventivo Tareas: Verificación de señal, calibración del sensor y limpieza de electrodos mensual Responsable: Instrumentista Criterio de intervención: Lectura errática, bloqueo de arranque de bomba.

Continúa en la siguiente página

Tabla 13 (continuación)

FALLO FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO
	2.a.3.4 Fallo de VDF	VDF ->Tipo: a condición Tareas: revisar logs, velocidad ordenada vs real semanal; limpieza y ventilación mensual; respaldo de parámetros trimestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: No arranca, alarmas repetidas; velocidad irregular/sin presión.

Cuadro 14: Estrategia de mantenimiento bombas verticales

FALLO FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO
3.a.1 No bombea	3.a.1.1 Rotura de empaquetadura	Empaquetadura ->Tipo: a condición Tareas: Inspección visual por turno; Temperatura y vibración semanal; ajuste de empaquetadura mensual Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Fuga continua, aumento de temperatura (10 °C).
	3.a.1.2 Desalineación de eje	Desalineamiento ->Tipo: a condición Tareas: Vibración semanal Responsable: Mecánico Criterio de intervención: vibración excesiva evidente.
	3.a.1.3 Fallo en motor eléctrico	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual, firma eléctrica trimestral, aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
	3.a.1.4 Fallo en VDF / señal	VDF ->Tipo: a condición Tareas: revisar logs, velocidad ordenada vs real semanal; limpieza y ventilación mensual; respaldo de parámetros trimestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: No arranca, alarmas repetidas; velocidad irregular/sin presión.
	3.a.1.5 Válvula de descarga cerrada	Válvula hidráulica ->Tipo: a condición Tareas: Inspección semanal; Checkear nivel mensual; Cambio de aceite semestral Responsable: Mecánico Criterio de intervención: cuchilla "pegada", fuga de aceite.
	3.a.1.6 Desgaste etapas/rotativo	Conjunto rotativo ->Tipo: preventivo cíclico Tareas: Overhaul anual Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5 %).
	3.a.1.7 Incrustación salina	Incrustación ->Tipo: preventivo cíclico Tareas: Overhaul anual Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5 %).
3.a.2 Caudal insuficiente	3.a.2.1 Rotura empaquetadura	Empaquetadura ->Tipo: a condición Tareas: Inspección visual por turno; Temperatura y vibración semanal; ajuste de empaquetadura mensual Responsable: Mecánico Criterio de intervención: Fuga continua, aumento de temperatura (10 °C).
	3.a.2.2 Desalineación de eje	Desalineamiento ->Tipo: a condición Tareas: Vibración semanal Responsable: Mecánico Criterio de intervención: vibración excesiva evidente.
	3.a.2.3 Motor eléctrico no alcanza las RPM necesarias	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual, firma eléctrica trimestral, aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
	3.a.2.4 Fallo en VDF / señal	VDF ->Tipo: a condición Tareas: revisar logs, velocidad ordenada vs real semanal; limpieza y ventilación mensual; respaldo de parámetros trimestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: No arranca, alarmas repetidas; velocidad irregular/sin presión.
	3.a.2.5 Desgaste etapas/rotativo	Conjunto rotativo ->Tipo: preventivo cíclico Tareas: Overhaul anual Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5 %).
	3.a.2.6 Incrustación salina	Incrustaciones ->Tipo: preventivo cíclico Tareas: Overhaul anual Responsable: Mecánico Criterio de intervención: señales de falla de rodamiento o caída en caudal (5 %).
3.a.3 No arranca	3.a.3.1 Motor eléctrico fuera de servicio	Motor eléctrico ->Tipo: a condición Tareas: Termografía mensual, firma eléctrica trimestral, aislamiento semestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: temperatura (+10 °C), variación de corriente (10 %), IR bajo.
	3.a.3.2 Bomba de refrigeración fuera de servicio	Bomba refrigeración ->Tipo: a condición Tareas: inspección por turno; Temperatura y vibración semanal; inspección motor eléctrico semanal Responsables: Mecánico, Eléctrico Criterio de intervención: Aumento de temperatura en bombas verticales, sistema no arranca debido a enclavamiento.
	3.a.3.3 Fallo sensor nivel	Fallo de sensor de nivel de estanque ->Tipo: Preventivo Tareas: Verificación de señal, calibración del sensor y limpieza de electrodos mensual Responsable: Instrumentista Criterio de intervención: Lectura errática, bloqueo de arranque de bomba.
	3.a.3.4 Disparo de protecciones/alarms VDF	VDF ->Tipo: a condición Tareas: revisar logs, velocidad ordenada vs real semanal; limpieza y ventilación mensual; respaldo de parámetros trimestral Responsable: Eléctrico Criterio de intervención: No arranca, alarmas repetidas; velocidad irregular/sin presión.

Como resultado, se consolidaron estrategias por tipo de bomba, asignando responsables y criterios de disparo verificables (por ejemplo, fugas, incrementos de temperatura, tendencias de vibración, bloqueos de arranque por instrumentación y eventos del variador). En consecuencia, el capítulo entrega un plan base para la programación inicial y el control del desempeño; sin embargo, se deja establecido que los umbrales y frecuencias deberán ajustarse una vez que la operación genere evidencias.

5.2. Software de control e indicadores

Una vez que el sistema entre en operación, se utilizará el software interno de la empresa SIPRO para registrar los eventos y efectuar el seguimiento operacional y de mantenimiento. Actualmente, esta plataforma se encuentra en proceso de mejora para incorporar el detalle del modo de falla que origina cada detención. De esta manera, a medida que se consolide el historial de datos será posible tomar decisiones basadas en evidencia, reduciendo progresivamente la dependencia exclusiva de la experiencia del personal y permitiendo el ajuste y mejora continua del plan de mantenimiento.

También se establece los indicadores a medir para llevar un control de la gestión del mantenimiento.

- Cumplimiento de actividades PM(%): mide la ejecución efectiva de las tareas preventivas programadas en el período.
- Disponibilidad: cuantifica la capacidad real de los activos para estar operativos cuando el proceso lo requiere.
- MTBF(tiempo promedio entre fallas): refleja confiabilidad al medir el tiempo promedio entre fallas funcionales o eventos que gatillan detención/intervención correctiva. Su evolución es clave para validar la efectividad del RCM y priorizar acciones de eliminación de causa raíz.
- MTTR(Tiempo promedio en reparar): mide mantenibilidad al cuantificar el tiempo promedio de reparación del equipo.
- incidencias/tasa de detenciones: permite identificar recurrencias, concentraciones por equipo/estación y modos de falla dominantes

Con la medición de esos indicadores es posible calcular la confiabilidad del sistema completo permitiendo identificar brechas y posibles mejoras.

6. Planificación de repuestos críticos

En las secciones anteriores, gran parte del análisis se sustentó en la experiencia del personal de las plantas PV y PB. Adicionalmente, la empresa utiliza el ERP SAP, específicamente el módulo CO, en el cual se registra la información asociada a compras y costos de cada planta. Este módulo concentra antecedentes clave para la gestión de repuestos, tales como descripción del material, historial de adquisiciones, fechas de compra, centro de costo asociado y demás datos logísticos relevantes.

Dado que en PV y PB se utilizan las bombas SPL-6, SPL-8 y Gould 3196 Lti para bombear salmuera al igual que en El Toco, resulta posible utilizar estos registros como base para fortalecer la planificación. En este contexto, y con el objetivo de asegurar una logística de repuestos eficiente para El Toco, el objetivo de este capítulo será el análisis de las bases de datos disponibles en SAP, identificando repuestos críticos y patrones de consumo que permitan definir cuantos repuestos y cuando comprarlos.

6.1. Repuestos críticos

Se considera repuesto críticos aquellos que su deterioro o mal estado pueda generar uno de los modos de falla que revisamos en capítulos pasados y cuya integridad mecánica se vea constantemente afectada p. ej. Sellos mecánicos, rodamientos, rodets y en general todos los componentes de la bomba que estén en contacto con la salmuera.

Desde el punto de vista de gestión de activos, la falta de estos repuestos impacta directamente los indicadores de desempeño, en particular la disponibilidad, ya que incrementa el tiempo de reparación al extender la detención hasta contar con el repuesto requerido (aumento del MTTR) y, en consecuencia, reduce la capacidad de recuperación del sistema frente a fallas recurrentes.

Para dimensionar los costos por detención de la línea. Considerando un precio de \$67 por kg de yodo[4] y que la línea transporta $189[m^3/h]$ con una concentración promedio de $0.8 [g/l]$ En consecuencia, cada hora de detención representa una pérdida del orden de US\$10.130, sin considerar costos adicionales asociados (mano de obra, energía, daños secundarios o penalizaciones operacionales). Este orden de magnitud refuerza que la logística de repuestos no es un aspecto accesorio del plan de mantenimiento, sino un habilitador directo de la continuidad operacional: la disponibilidad oportuna de componentes críticos reduce el tiempo de reparación (MTTR), evita esperas por abastecimiento y permite restituir la operación en el menor tiempo posible, protegiendo la disponibilidad de la línea y el valor económico del producto transportado.

6.2. Tratamiento de las bases de datos

El módulo CO de SAP permite exportar los registros de compras en formato de hoja de cálculo (Excel), incorporando múltiples campos relevantes para el análisis, tales como fecha de compra, fecha de contabilización, clase de costo, centro de costo, orden de compra (OC), entre otros. Dado el volumen y diversidad de información disponible, fue necesario aplicar criterios de filtrado para discriminar únicamente los registros pertinentes al alcance del estudio.

Para este propósito se utilizó el centro de costo como variable principal de segmentación, debido a que, de los 24 centros de costo existentes en la planta de Pampa Blanca (PB), solo dos concentran las adquisiciones de materiales asociadas al área de mantención relevante para este trabajo: el centro 04-831201, correspondiente a la compra de materiales del área de mantención pozas, donde se encuentran los equipos SPL; y el centro 01-404011, asociado a la compra de materiales de mantención de los equipos del sistema de yoduro. Posteriormente se filtro por denominación de clase de costo dejando, por ultimo se utilizo la función buscar de Excel para buscar por código los repuestos identificados y verificarlos en SAP que correspondieran al equipo objetivo.

En conjunto con personal de planificación se determinaron lo siguientes repuestos como críticos:

Cuadro 15: Repuestos críticos

Cod	Materiales Básicos	Sist/Equi	oCosto/u
3068942	Sello mecan., E-440, Chesterton, 2-1/8 pulg	3196 LTi	\$ 752.00
3050738	Ajuste, 351, Gould 3196 LTI 2x3-13, bomba centrífuga Goulds	3196 LTi	40 (referencial)
3100994	O-ring, impeller, 412A, Goulds, 3196LTX, bomba centríf. Goulds	3196 LTi	\$ 29.00
3065132	Sello laberinto, L1I15-PP-001-I22, Aesseal, Labtecta, bomba 3196LTX, lado motor, 1-7/8 pulg dia, ac inox AIS	3196 LTi	\$ 508.79
3065135	Sello laberinto, L1I17-PP-001-I23, Aesseal, Labtecta, bomba 3196LTX, lado impulsor, 2-1/8 pulg dia, ac inox	3196 LTi	\$ 494.00
3116408	Rodamiento, bola, 7310-BECBJ, SKF	3196 LTi	\$ 52.44
3116195	Rodamiento, bola, 6311, SKF, radial	3196 LTi	\$ 31.63
	Eje 3196 LTi	3196 LTi	\$ 350.00
3062282	Impulsor SPL 8 FF	SPL-8	\$ 450.00
3054194	Conjunto reparación, 121740071, Sihi, O-ring y retén aceite SPL-8	SPL-8	\$ 123.00
3187221	Visor nivel, G-R S1471, Gorman Rupp, T-10, bomba, visor nivel	SPL-8	
3054194	Kit empaquetadora O-ring y retén aceite SPL 8	SPL-8	\$ 45.00
3191074	Caja rodamiento SPL 8 (excepcional)	SPL-8	\$ 7,421.16
3065309	Sello mecánico SPL 8	SPL-8	\$ 350.00
3121871	Eje SAE 4140 (acero al carbono)	SPL-8	\$ 386.82
3115604	Rodamiento, bola, 3311-ENR-C3, SKF, contacto, ang, 55 mm D.I, C3, 2 hilera, FAG	Sihi SPL 8, SPL 6,	\$ 54.00
3115598	Rodamiento, bola, 3310-E, SKF, con	Sihi SPL 8, SPL 6,	\$ 138.00
3115280	Rodamiento, 6308-C3, SKF, bola, alternativa FAG	SPL-6	
3121868	Eje, bomba, 121740003, Sihi Chile, SPL 6-4, bomba centrífuga autocebante, uso en bbas planta KCl	SPL-6	\$ 376
3098330	Camisa, eje, 11876-A, Gormrupp, T6A3-8-U3B60-B, bomba	SPL-6	\$ 21.00
3167497	Caja de rodamiento SPL-6 (excepcional)	SPL-6	\$ 2,257.00
3065306	Sello, mecánico, 121740025, Sihi Chile, SPL 6-4, bomba centríf. autocebante	SPL-6	\$ 267.52
3068276	Impulsor, 121740010, Sihi Chile, SPL 6, bomba centrífuga autocebante	SPL-6	\$ 350
3108320	Placa desgaste SPL-6 (excepcional)	SPL-6	\$ 180
3052088	Kit empaquetadura/O-ring, 146710058, Sihi, SPL 6, bomba autocebante	SPL-6	\$ 43
4000382	Aceite anti wear, Lubricant 68, Bel-Ray, hidráulico, tambor 208 L, equivalencia SAE (tambor)	Bombas	\$ 1,160.00
	Acoplamiento RTP-319	BOMBAS	\$ 400.00
3189417	Acoplamiento ES-40 flexible	BOMBAS	\$ 438.00
3047327	Acoplamiento ES-30 flexible	BOMBAS	\$ 405.00
3078014	Correa, V, 5VX900, 5VX sección, 90	SPL-6/8	\$ 55

Estos son los repuestos actualmente codificados en SAP, lo que equivale a los repuestos que han sido adquiridos durante los últimos dos años de operación de la planta Pampa Blanca (PB). Cabe señalar que, a la fecha, no se dispone de codificación ni historial de compra para repuestos asociados a las bombas Vogt MDP 80-250 y MDP 100-250, debido a que

corresponden a equipos nuevos y, por tanto, aún no existe consumo registrado. No obstante, considerando la similitud funcional con las bombas Goulds 3196 LTi en cuanto a principios de operación, componentes críticos recurrentes y modos de falla típicos, se adoptó como hipótesis inicial la utilización de repuestos equivalente, quiere decir que se compraran los ejes, rodamientos, sellos mecánicos, acoplamientos, etc, con la misma frecuencia que las bombas Gould 3196 Lti.

Además de identificar los repuestos, se extrajo su frecuencia de compra a partir de los registros en SAP (la información sobre la cantidad y frecuencia de compra se encuentra en el Anexo A), permitiendo caracterizar patrones de consumo y construir una proyección inicial de repuestos para El Toco. Esto resulta en un costo de repuestos anual de \$ 121.826, con un costo de promedio \$ 10.154 mensual. Esta proyección debe ser revisada y actualizada cada 4 meses debido a que la línea posee elementos de seguridad que impiden su funcionamiento en seco, por lo que el consumo de elementos del conjunto rotativo debería ser menor en la realidad.

7. Procedimientos Operativos Estándar (SOP's)

En sistemas industriales donde la continuidad operacional depende de equipos de bombeo y subestaciones distribuidas, la confiabilidad no se sostiene únicamente en la calidad del mantenimiento, sino también en la forma en que se ejecutan las operaciones rutinarias y de contingencia. En este contexto, un SOP (Standard Operating Procedure o Procedimiento Operacional Estándar) es un documento formal que describe, de manera secuencial, clara y verificable, la forma correcta y segura de realizar una actividad operativa. Un SOP define condiciones previas, responsables, pasos de ejecución, puntos de control, criterios de aceptación y acciones ante desviaciones, con el objetivo de reducir la variabilidad entre turnos y asegurar resultados repetibles.

La importancia de los SOP se vuelve especialmente crítica en la línea de impulsión El Toco debido a una particularidad organizacional del sistema: la unidad de mantención debe mantener y, además, operar las subestaciones Poza 0, Coya sur, Vergara. Esta doble responsabilidad implica que las decisiones y maniobras operacionales (puesta en marcha, detención controlada, aislamiento, apertura/cierre de válvulas, respuesta ante alarmas y enclavamientos, coordinación con sala de control y trabajos en terreno) tienen un impacto directo en la integridad de los equipos, la seguridad del personal y la disponibilidad de la línea. En consecuencia, disponer de procedimientos estandarizados permite disminuir la probabilidad de errores operacionales, mejorar la coordinación operacional-mantenimiento y asegurar que las maniobras críticas se ejecuten bajo criterios uniformes, particularmente en condiciones anormales o de emergencia.

En las secciones siguientes se presenta el SOP para la puesta en marcha del sistema de porteo de salmuera orientado a la operación de los sistemas de bombeo y sus subestaciones, considerando condiciones normales de funcionamiento, paradas programadas y de emergencia. para la creación de estos documentos se adaptó el formato utilizado en el SOP de puesta en marcha de la planta de yoduro y se apoyó en la operación actual del sistema por los operadores en terreno.

Se seguirá la siguiente estructura para la generación del documento:

1. Definición de objetivo, responsables, recursos, requisitos de seguridad, riesgos críticos y funciones de la sala de control.
2. Diagrama de flujo con instrumentación para el control.
3. Procedimiento puesta en marcha.
4. Procedimiento detención programada y de emergencia.

7.1. SOP Puesta en marcha porteo de salmuera

Objetivos:

- Arrancar y detener el sistema en condición estable evitando: trabajo en seco, pérdida de cebado, cavitación y sobrepresión.

Responsables:

- Operadores/Mecánicos(Sala de control/Terreno):Arranque y monitoreo. Condición bomba y válvulas , fugas, alertar de condición de operación irregulares (cavitación, ruido elevado, etc.)
- Eléctrico/Instrumentista: Verificar sentido de giro si hubiese habido alguna intervención eléctrica.

Recursos:

- EPP básicos (Casco, gafas, Vestimenta antiácido , guantes anti-impacto y zapatos de seguridad).

Requisitos de seguridad:

- Estar instruido en este instructivo.
- Elaborar HCR en terreno.
- Controlar el acceso al área.
- Mantener accesos y vías de evacuación expeditas.
- Mantener Área de trabajo limpia y despejada.

Riesgos críticos:

- Exposición y contacto con salmuera.
- Caída del mismo o distinto nivel producto de tropiezos o resbalones al desplazarse por el área, subir y bajar escaleras.
- Golpes en las manos por uso de herramientas.
- Atrapamiento de extremidades

Sala de control:

- Debe instruir a todo el personal en este instructivo, realizando prueba y quedando registro en la hoja de capacitación.

7.1.1. Diagrama de flujo con instrumentación para el control

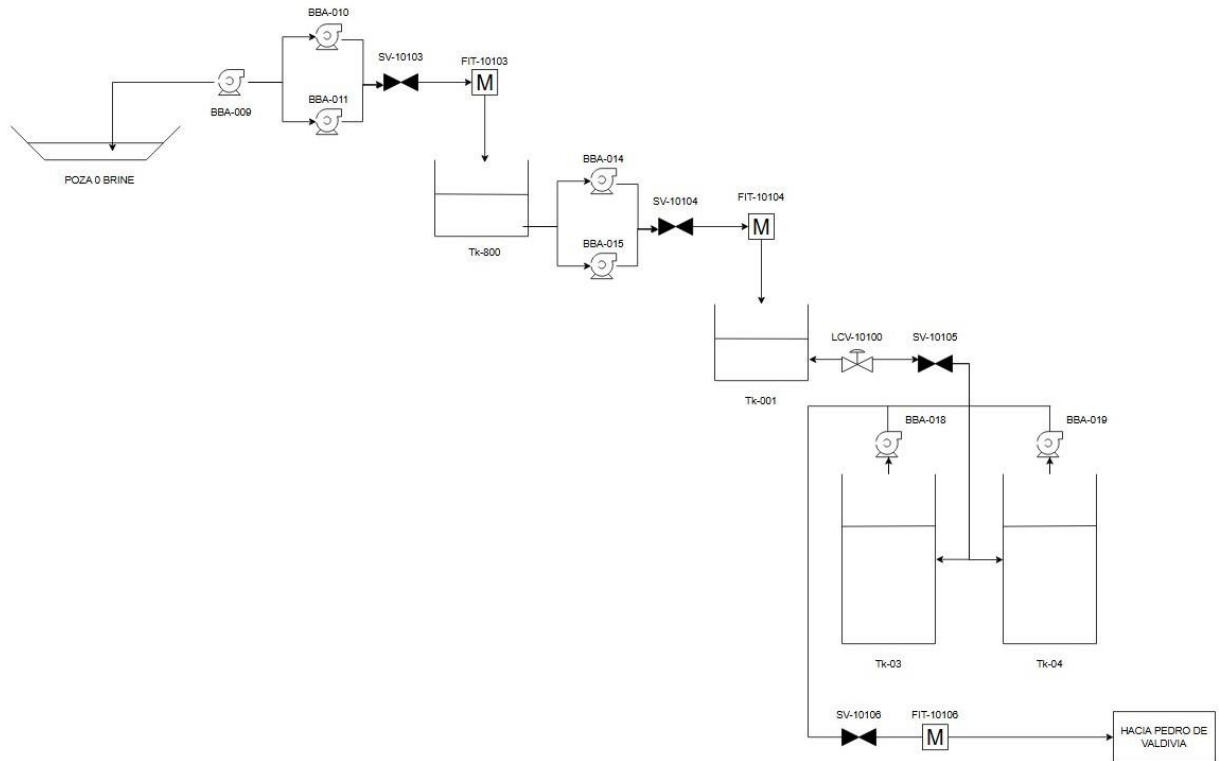


Figura 21: Diagrama de flujo porteo de salmuera.

7.1.2. Puesta en marcha Porteo

Acciones previas

Terreno:

- Verificar giro libre de los ejes de las bombas.
- Todas las conexiones deben estar selladas.
- Verificar niveles de lubricante
- Comprobar sentidos de giro en caso de intervención eléctrica
- Verificar que BBA-009 este completamente cebada
- Verificar que todas las válvulas de guillotina manuales estén completamente abiertas
- Válvulas válvulas de control SV-10103, SV-10104, SV-10105, SV-10106 estén cerradas.

Sala de control

- Verificar que alarmas estén apagadas.
- Comprobar nivel de pozas y estanques.

Puesta en marcha

1. Poner en servicio la bomba BBA-009.
2. Verifique que la bomba gira suavemente.
3. Verifique que no hay fugas.
4. Verifique temperatura de rodamientos.
5. Compruebe que la corriente consumida sea nominal.
6. Poner en servicio BBA-010.
7. Repetir pasos 2, 3, 4 y 5.
8. Abrir válvula SV-10103.
9. Revisar presión de descarga y flujómetro FIT-10103.
10. Cuando el TK-800 supere el 40 % de capacidad, poner en servicio BBA-014.
11. Verificar giro libre, fugas, rodamientos, corriente consumida.
12. Abrir válvula SV-10104.
13. Revisar presión de descarga y flujómetro FIT-10104.
14. Cuando el TK-001 supere el 40 % de capacidad.
15. Abrir válvula LCV-10100.
16. Abrir válvula SV-10105.
17. Poner en servicio BBA-001 de refrigeración y verificar que esté recirculando.
18. Poner en servicio BBA-019.
19. Abrir válvula SV-10106.
20. Si se detecta anomalía (fuga continua, vibración alta, temperatura rodamientos fuera de rango, alarma de succión/descarga), detenga según SOP de detención forzada y notifique a supervisión/operadores en terreno.

7.1.3. Detención Programada

1. Avisar de detención de porteo.
2. Detener reduciendo progresivamente hasta la velocidad mínima del VDF BBA-019.
3. Cerrar SV-10106.
4. Cerrar LCV-10100.
5. Cerrar SV-10105.
6. Detener reduciendo progresivamente hasta la velocidad mínima del VDF BBA-014.
7. Cerrar SV-10104.
8. Detener reduciendo progresivamente hasta la velocidad mínima del VDF BBA-010.
9. Detener reduciendo progresivamente hasta la velocidad mínima del VDF BBA-009.
10. Cerrar SV-10103.
11. Verifique detención y registre valores finales FIT y LIT.

7.1.4. Detenciones de emergencia

Criterios de detención forzada:

- Fuga, rotura de línea
- Evidente malfuncionamiento de equipo o componente críticos (enfriamiento motor eléctrico, cavitación excesiva, vibraciones, etc.)
- Caída o alza abrupta de presión.

En caso de fuga:

1. Comunicarse con sala de control inmediatamente luego de detectar la fuga.
2. Detener el sistema según SOP de detención.
3. Aislar parte afectada cerrando válvulas o guillotinas manuales.
4. Aplicar procedimientos de bloqueo de energías.
5. Evaluar la fuga y determinar cómo reparar la línea.
6. Dejar registro de la falla.

En caso de malfuncionamiento:

1. Reportar malfuncionamiento y avisar a sala de control; detener el porteo.
2. Detener el sistema según SOP de detención.
3. Aplicar procedimientos de bloqueo de energías en equipos afectados.
4. Evaluar el fallo e iniciar acciones para reparar.
5. Dejar registro de la falla.

En caso de caída o alza de presión:

1. Detener el sistema según SOP de detención.
2. Avisar inmediatamente a supervisores y operadores en terreno para que investiguen.
3. Una vez hallada la causa, aplicar procedimientos de bloqueo de energías.
4. Reparar falla.
5. Dejar registro de la falla.

8. Conclusión y sugerencias

Conclusiones

El presente trabajo permitió desarrollar una base estructurada para la gestión del mantenimiento en la fase inicial de la línea de impulsión de salmuera y el sistema de riego de pilas de lixiviación de la faena El Toco. Dado que la operación se encuentra en etapa de comisionamiento y no cuenta con historial de fallas, el enfoque adoptado combinó metodologías cualitativas y semi-cuantitativas apoyadas en los lineamientos de las normas ISO 55000 para gestión de activos e ISO 31000 para gestión de riesgos, permitiendo establecer criterios sistemáticos para la toma de decisiones en el mantenimiento de los equipos críticos.

A partir del levantamiento del sistema y la elaboración del inventario de activos, se realizó una jerarquización de equipos mediante una matriz de criticidad por riesgo, lo que permitió identificar los activos con mayor impacto potencial sobre la continuidad operacional. Sobre esta base se desarrolló un análisis AMFE para los equipos críticos del sistema de impulsión, identificando sus funciones, fallos funcionales, modos de falla y consecuencias operacionales, lo que permitió definir estrategias de mantenimiento acordes al contexto operacional.

El resultado principal del trabajo fue la formulación de un plan de mantenimiento que integra tareas preventivas y a condición, junto con criterios de intervención, frecuencias iniciales y responsabilidades. Este plan se complementó con la definición de indicadores de gestión orientados al seguimiento del desempeño del mantenimiento, tales como cumplimiento del plan, disponibilidad de equipos, MTBF, MTTR e incidencias operacionales.

Asimismo, se incorporó la dimensión logística mediante la planificación de repuestos críticos, utilizando información histórica proveniente del ERP SAP y la experiencia operacional de las plantas PB y PV. Este análisis permitió identificar los componentes cuya indisponibilidad podría comprometer la continuidad del proceso, dimensionando su impacto económico y estableciendo criterios para su gestión y reposición.

Finalmente, el desarrollo de procedimientos operacionales estandarizados (SOP) para la operación de la línea de impulsión contribuye a reducir la variabilidad operacional. En conjunto, los resultados obtenidos proporcionan una base técnica inicial para la implementación de un sistema de mantenimiento planificado en la faena El Toco, orientado a mejorar la confiabilidad de los activos, reducir detenciones no programadas y asegurar la continuidad del transporte de salmuera hacia la planta Pedro de Valdivia.

Sugerencias

- Asegurar que el registro de datos operacionales y de mantenimiento se realice de forma sistemática y estandarizada, ya que la calidad de esta información determinará la confiabilidad de los indicadores y la correcta retroalimentación del modelo RCM.
- Revisión periódica de los planes para afinar frecuencias y criterios teniendo en cuenta los datos generados por la operación de esta forma refinar el AMFE transicionando a un enfoque meramente cuantitativo.
- Consolidar el sistema de indicadores como rutina de gestión: establecer reuniones periódicas de revisión para seguimiento de cumplimiento PM, análisis de incidencias, y evolución de disponibilidad, MTBF y MTTR, vinculando acciones correctivas a hallazgos concretos.
- Evaluar implementación de CMMS/ERP que permita facilitar la gestión que a día de hoy se lleva a cabo principalmente con planilla Excel.
- Capacitar a supervisores y planificadores en las metodología AMFE de forma que tengan noción y perciban la utilidad y ventajas de implementar dichas técnicas.

Referencias

- [1] Moubray, J. (2004). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad* (3. ed.; 1. ed. en castellano).
- [2] Parra Crespo, D. (2019). *Gestión de activos basada en ISO 55000* (Versión 20)
- [3] ISO. (2018). *ISO 31000:2018 Gestión del riesgo – Directrices* (2. ed., 2018-02; traducción oficial).
- [4] Sociedad Química y Minera de Chile S.A. (SQM), *Memoria Anual 2024*, Reporte anual corporativo.
- [5] Valdenegro O., R. (2025). *MEC-382: Ingeniería de Mantenimiento / IMM-240: Mantenimiento Industrial. Clases 7 a 12 (UT2): Equipos críticos y técnicas básicas de mantenimiento (NDT)* [Presentación en PowerPoint]. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, abril 2025.
- [6] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*, ISO, Geneva, Switzerland, 2016.
- [7] Servicios Procure SpA. (2025). *Memoria de cálculo hidráulica: Brine Toco Norte – Toco Sur (Documento SQM N° M0092-16323-MC-500-101)*. SQM S.A.
- [8] Servicios Procure SpA. (2025). *Memoria de cálculo hidráulica: Brine Toco Sur – Maria Elena (Documento SQM N° M0092-16323-MC-500-102)*. SQM S.A.
- [9] Servicios Procure SpA. (2025). *Memoria de cálculo hidráulica: Brine Maria Elena – Coya Sur (Documento SQM N° M0092-16323-MC-500-103)*. SQM S.A.
- [10] Servicios Procure SpA. (2025). *Memoria de cálculo hidráulica: Brine Coya Sur – Vergara (Documento SQM N° M0092-16323-MC-500-104)*. SQM S.A.
- [11] Servicios Procure SpA. (2025). *Memoria de cálculo hidráulica: Brine Vergara – Pedro de Valdivia (Documento SQM N° M0092-16323-MC-500-105)*. SQM S.A.
- [12] Servicios Procure SpA. (2025). *Memoria de cálculo hidráulica: Agua Toco Sur – Toco Norte (Documento SQM N° M0092-16323-MC-500-107)*. SQM S.A.
- [13] Ruhrpumpen. (2020). *VTP: Installation, Operation and Maintenance Manual* (V5.031220).

Appendices

A. Frecuencia y cantidad de compras

Cuadro 16: Proyección de repuestos 2026 (cantidades mensuales).

CÓDIGO	MATERIAL	EQUIPO	COSTO	EN	FB	MF	AB	MA	JU	JL	AG	SE	OC	NV	DC
3068942	SELLO MECAN,E-440,CHESTERTON,2-1/8PULG	3196 LTi	\$ 752.00	3		3		3		3		3		3	
3050738	AJUSTE,351, GOULD BOMBA CENTRIFUGA GOULDS	3196 LTi	40												
3100994	O-RING,IMPELLER, 412A, GOULDS, 3196LTX, BOMBA CENTRIF GOULDS	3196 LTi	\$ 29.00	3		3		3		3		3		3	
3075725	INDICADOR,NIVEL,319, GOULDPMP, 3196MTX (EXCEPCIONAL)	3196 Lti													
3065132	SELLO,LABERINTO, L1I15-PP-001-I22, AESSEAL, LABTECTA, BOMBA 3196LTX,LADO MOTOR,1-7/8PULG DIA,AC INOX AIS	3196 LTi	\$ 508.79	3			3			3				3	
3065135	SELLO,LABERINTO,L1I17-PP-001-I23, AESSEAL, LABTECTA, BOMBA 3196 LTX,LADO IMPULSOR,2-1/8PULG DIA,AC INOX	3196 LTi	\$ 494.00	3			3			3				3	
3116408	RODAMIENTO,BOLA,7310-BECBJ,SKF	3196 LTi	\$ 52.44	3			3			3				3	
3116195	RODAMIENTO,BOLA,6311,SKF,RADIA	3196 LTi	\$ 31.63	3			3			3				3	
	EJE 3196 Lti	3196 LTi	\$ 350.00	3			3			3				3	
	SELLO MEC VOGT 80-250	VOGT 80-250	\$ 752.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(continúa en la siguiente página)

Cuadro 16 (continuación)

CÓDIGO	MATERIAL	EQUIPO	COSTO	EN	FB	MF	AB	MA	JU	JL	AG	SE	OC	NV	DC
	AJUSTE VOGT 80-250	VOGT 80-250	40 (referencial)												
	O-RING,IMPELLER VOGT 80-250	VOGT 80-250	\$ 29.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SELLO LABERINTO, LADO MOTOR VOGT 80-250	VOGT 80-250	\$ 509.00	1			1			1			1		
	SELLO LABERINTO, LADO IMPULSOR VOGT 80-250	VOGT 80-250	\$ 494.00	1			1			1			1		
	RODAMIENTO BOLA VOGT 80-250	VOGT 80-250	\$ 31.00	2			1			1			1		
	RODAMIENTO AXIAL 80-250	VOGT 80-250	\$ 53.00	2			1			1			1		
	EJE VOGT 80-250	VOGT 80-250	\$ 350.00	1			1			1			1		
	SELLO MEC VOGT 100-250	VOGT 100-250	\$ 752.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	AJUSTE VOGT 100-250	VOGT 100-250	40												
	O-RING,IMPELLER VOGT 100-250	VOGT 100-250	\$ 29.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SELLO LABERINTO, LADO MOTOR VOGT 100-250	VOGT 100-250	\$ 509.00	1			1			1			1		
	SELLO LABERINTO, LADO IMPULSOR VOGT 100-250	VOGT 100-250	\$ 494.00	1			1			1			1		
	RODAMIENTO BOLA VOGT 100-250	VOGT 100-250	\$ 31.00	2			1			1			1		
	RODAMIENTO AXIAL 100-250	VOGT 100-250	\$ 53.00	2			1			1			1		

(continúa en la siguiente página)

Cuadro 16 (continuación)

CÓDIGO	MATERIAL	EQUIPO	COSTO	EN	FB	MF	AB	MA	JU	JL	AG	SE	OC	NV	DC
	EJE VOGT 100-250	VOGT 100-250	\$ 350.00	1			1			1			1		
	SELLO MEC SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	\$ 752.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	AJUSTE SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	40												
	O-RING,IMPELLER SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	\$ 29.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SELLO LABERINTO, LADO MOTOR SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	\$ 509.00	1			1			1			1		
	SELLO LABERINTO, LADO IMPULSOR SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	\$ 494.00	1			1			1			1		
	RODAMIENTO BOLA SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	\$ 31.00	1			1			1			1		
	RODAMIENTO AXIAL SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	\$ 53.00	1			1			1			1		
	EJE VOGT SIHI NOWA 12250	SIHI NO-WA 12250	\$ 350.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3062282	Impulsor SPL 8 FF	SPL-8	\$ 450.00			2				2				2	
3187221	VISOR NIVEL,G-R S1471,GORMAN RUPP,T-10,BOMBA,VISOR NIVEL	SPL-8													
3054194	Kit empaquetadora Oring y retén aceite SPL 8	SPL-8	\$ 45.00			2				2				2	
3191074	CAJA RODAMIENTO SPL 8 (EXCEPCIONAL)	SPL-8	\$ 7,421.16												
3065309	Sello Mecánico SPL 8	SPL-8	\$ 350.00	4		2		2		2		2		2	
3121871	Eje SAE 4140 (acero al carbonó)	SPL-8	\$ 386.82	2		1		1		1		1		1	

(continúa en la siguiente página)

Cuadro 16 (continuación)

CÓDIGO	MATERIAL	EQUIPO	COSTO	EN	FB	MF	AB	MA	JU	JL	AG	SE	OC	NV	DC
3115604	RODAMIENTO,BOLA,3311-ENR-C3,SKF,CONTACTO,ANG,55MM D.I,C3,2 HILERA,FAG	Sihi SPL 8, SPL 6,	\$ 54.00			3		3		3		3		3	
3115598	RODAMIENTO,BOLA,3310-E,SKF,CON	Sihi SPL 8, SPL 6,	\$ 138.00			3		3		3		3		3	
3115280	RODAMIENTO,6308-C3,SKF,BOLA,ALTERNATIVA FAG	SPL-6													
3121868	EJE,BOMBA,121740003,SIHI CHILE,SPL 6-4,BOMBA CENTRIFUGA AUTOCEBANTE,USO EN BBAS PLANTA KCL	SPL-6	\$ 376	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3098330	CAMISA,EJE,11876-A,GORMRUPP,T6A3-8-U3B60-B,BOMBA	SPL-6	\$ 21.00	1			1			1				1	
3167497	CAJA DE RODAMIENTO SPL-6(EXCEPCIONAL)	SPL-6	\$ 2,257.00												
3065306	SELLO,MECÁNICO,121740025,SIHI CHILE,SPL 6-4,BOMBA CENTRIF AUTOCEBANTE	SPL-6	\$ 267.52	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3068276	IMPULSOR,121740010,SIHI CHILE,SPL 6,BOMBA CENTRIFUGA AUTOCEBANTE	SPL-6	\$ 350			2				2				2	
3108320	PLACA DESGASTE SPL-6 (Excepcional)	SPL-6	\$ 180												
3052088	KIT EMPAQUETADURA/O-RING,146710058,SIHI,SPL 6,BOMBA AUTOCEBANTE	SPL-6	\$ 43	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

(continúa en la siguiente página)

Cuadro 16 (continuación)

CÓDIGO	MATERIAL	EQUIPO	COSTO	EN	FB	MA	AB	MA	JU	JL	AG	SE	OC	NV	DC
4000382	ACEITE ANTI WEAR,LUBRICANT 68,BEL-RAY,,LUBRICANT 68,BEL- RAY,HIDRAULICO,TAMBOR 208LT,EQUIVALENCIA SAE (tam- bor)	Bombas	\$ 1,160.00							1					
	ACOPLAMIENTO ES-60	BOMBAS	\$ 460.00		1					1				1	
3189417	ACOPLAMIENTO ES-40 FLEXIBLE	BOMBAS	\$ 438.00		2					2				2	
3047327	ACOPPLAMIENTO ES-30 FLEXIBLE	BOMBAS	\$ 405.00		3					3				3	
3078014	CORREA,V,5VX900,5VX SECCION,90	SPL-6/8	\$ 55							12		6			