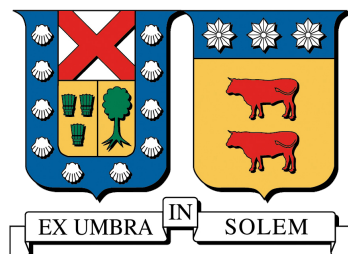


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO, CHILE



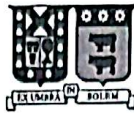
**DISEÑO DE ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO
CENTRADA EN RIESGOS PARA LA RED DE TUBERÍAS
DEL AGUA DE PROCESOS EN LA MOLIENDA SAG EN
DIVISIÓN DE EMPRESA MINERA DE COBRE, DE LA
REGIÓN DE VALPARAÍSO.**

IGNACIO ANDRÉS VERGARA BEIZA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA	:	DR. ING. PEDRO SARIEGO P.
PROFESOR/A CORREFERENTE	:	MG. ING. RENÉ VALDENEGRO O.
SUPERVISOR	:	ING. GUSTAVO LÓPEZ C.

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 Estrategia de Mantenimiento Centrada en Riesgos para la Red de tuberías del agua de Probas en La Huelenda SAB en división de Empresa minera de cobre de la Región de Valparaíso

Nombre del candidato(a):

Ignacio Andrés Vergara Beige

Carrera / Grado:

Ingeniería Civil Mecánica

Campus: CASA Central Valparaíso Departamento: Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pedro Santiago Pastor, 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: 20/03/2026

Firma: [Firma]

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/03/2026

Firma: [Firma]

Agradecimientos

Me siento profundamente agradecido con todas las personas que me acompañaron a lo largo de mi proceso formativo. En primer lugar, a mi familia, por su apoyo incondicional y por estar siempre conmigo, deseándome lo mejor en cada día de este camino universitario.

Agradezco especialmente a mi madre, Sandra Beiza, y a mi abuela, Rebeca Vilches, las mujeres más importantes de mi vida. Gracias por su amor, su cariño y por cuidarme desde que tengo memoria. Las amo con todo mi corazón. Han sido el pilar fundamental de nuestra familia, mujeres fuertes y luchadoras. Sinceramente, podría dedicar una tesis completa solo para expresar todo lo que significan para mí.

A mi padre, Jorge Vergara, gracias por ser un ejemplo de responsabilidad, trabajo y perseverancia. Te admiro profundamente por nunca dejar de luchar por sacar a tu familia adelante, incluso en los momentos más difíciles. A mi hermano, Jorge Nicolás, gracias por ser mi compañero de vida, por reír, jugar, pelear y llorar conmigo. Eres increíblemente talentoso y me siento orgulloso de ser tu hermano.

También agradezco con cariño a mis tíos Gustavo y Juan, a Ximena, a mis primas Cynthia y Evelyn, y a Felipe. Gracias por estar ahí cuando los necesité.

De manera muy especial, quiero agradecer a mis compañeros de universidad Alonso, Benjamín, Diego, Gustavo y Marcelo, que se convirtieron en mis amigos y luego en verdaderos hermanos. Gracias por compartir esta etapa de mi vida; por acompañarme en los momentos de alegría, estrés, tristeza y también en los de gloria. Fueron otro pilar fundamental durante mi paso por la universidad. Aprendí algo valioso de cada uno de ustedes que llevaré conmigo cada día en mi vida.

Tener a cada uno de ustedes acompañándome me ayudó a ser más fuerte, más enfocado y una mejor persona. Con ustedes perdurarán los recuerdos que formé desde las noches de estudio durante la pandemia hasta, seis años después, momentos imborrables que llevaré conmigo siempre.

Finalmente, quiero expresar mi más sincera gratitud a Codelco, especialmente al equipo de la Superintendencia de Infraestructura, a mi tutor Gustavo López y a mis profesores Pedro y René. Gracias por confiar en mí para desarrollar esta memoria y por brindarme su guía y apoyo en todo momento. Su orientación fue clave para concretar este trabajo, y les estaré eternamente agradecido.

Resumen

La minería del cobre enfrentó el desafío permanente de maximizar la disponibilidad de activos críticos para sostener la continuidad operacional. En este contexto, la Molienda SAG constituyó un eslabón determinante de la cadena de valor, donde la confiabilidad de la red de tuberías de agua de procesos resultó decisiva, aunque históricamente fue subvalorada.

Este trabajo diseñó una estrategia de mantenimiento centrada en riesgos para la red de agua de procesos del área SAG en una faena de la Región de Valparaíso. La problemática abordada se relacionó con tasas elevadas de fallas imprevistas y degradación acelerada por incrustación y desgaste, que previamente fueron gestionadas bajo un enfoque reactivo. La metodología integró el marco SOMA con RCM para válvulas e instrumentación y una adaptación de RBI (API 581) para ductos, jerarquizando activos mediante matrices de riesgo/criticidad ($PoF \times CoF$) y definiendo planes matrices diferenciados (correctivo programado, preventivo y predictivo).

La evaluación económica consideró explícitamente el capital de trabajo. En el escenario base, la estrategia resultó financieramente viable: $VAN = 40,8$ kUSD, $TIR \approx 27\%$ y $PAYBACK \approx 3,5$ años. El punto de equilibrio se alcanzó con la evitación de solo 0,93 horas/año de detención no programada. Adicionalmente, se validó el Límite Económico de Reparación (ERL) para decidir entre reparar o reemplazar válvulas clave, y se propuso una hoja de ruta de escalabilidad y evolución hacia monitoreo en línea.

La estrategia resultante permitió transitar desde la reactividad hacia una gestión proactiva basada en riesgo, optimizando recursos y habilitando su replicabilidad en otras redes críticas de la Planta Concentradora.

Palabras clave: Mantenimiento Centrado en Riesgos, SOMA, RCM, RBI, ERL, Molienda SAG, Gestión de Activos, Confiabilidad Operacional.

Abstract

Copper mining faced the constant challenge of maximizing the availability of critical assets to sustain operational continuity. In this context, SAG Milling constituted a decisive link in the value chain, where the reliability of the process water piping network proved to be critical, although historically undervalued.

This work designed a risk-centered maintenance strategy for the process water network of the SAG area at a mining site in the Valparaíso Region. The addressed problem related to high rates of unforeseen failures and accelerated degradation due to scaling and wear, which were previously managed under a reactive approach. The methodology integrated the SOMA framework with RCM for valves and instrumentation, and an adaptation of RBI (API 581) for pipelines, ranking assets through risk/criticality matrices ($\text{PoF} \times \text{CoF}$) and defining differentiated master plans (scheduled corrective, preventive, and predictive).

The economic evaluation explicitly considered working capital. In the base scenario, the strategy proved to be financially viable: $\text{NPV} = 40,8 \text{ kUSD}$, $\text{IRR} \approx 27\%$, and $\text{PAYBACK} \approx 3,5 \text{ years}$. The break-even point was reached by avoiding only 0,93 hours/year of unscheduled downtime. Additionally, the Economic Repair Limit (ERL) was validated to decide between repairing or replacing key valves, and a roadmap for scalability and evolution toward online monitoring was proposed.

The resulting strategy allowed for a transition from reactivity to proactive risk-based management, optimizing resources and enabling its replicability in other critical networks of the Concentrator Plant.

Keywords: Risk-Centered Maintenance, SOMA, RCM, RBI, ERL, SAG Milling, Asset Management, Operational Reliability.

ÍNDICE

Agradecimientos	i
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. Información de la empresa	3
3.1. Propósito, misión y valores	4
3.2. División Andina	5
3.3. Superintendencia de Infraestructura	7
3.3.1. Desafíos a resolver	9
4. Contexto del problema	11
4.1. Contexto operacional	11
4.2. Métodos para afrontar actualmente la problemática	13
4.3. Consecuencias asociadas a mantener el contexto operacional	14
4.4. Oportunidad de mejora	14
4.5. Propuesta de memoria	15
4.6. Delimitación y alcance del problema	15
4.7. Situación futura deseada	15
4.8. Carta Gantt	16
5. Marco Teórico	17
5.1. Sistema Operativo de Mantenimiento de Codelco	17
5.1.1. Estructura SOMA	17
5.1.2. Fases clave del SOMA	17
5.2. Mantenimiento Centrado en Riesgos	18
5.2.1. Adaptación de PoF de RBI para incrustación	21
5.3. Mantenimiento centrado en confiabilidad	24
5.3.1. Proceso de las 7 preguntas	24
5.3.2. Complementariedad y Distinciones entre RCM y RBI	26
5.4. Agua de procesos	28
5.5. Mecanismos de deterioro dominantes en el agua de procesos en la molienda SAG	28
5.5.1. Incrustación de partículas calcáreas	28
6. Estado del arte	30
6.1. Casos destacados en minería	30
6.2. Tecnologías emergentes para monitoreo basado en condición y mantenimiento basado en riesgo	31
6.3. Tecnologías aplicables a redes de piping	31

7. Metodología	33
7.1. Fase I: Diagnóstico y acotamiento del problema	33
7.2. Fase II: Análisis de criticidad y priorización del sistema de tuberías seleccionado	33
7.3. Fase III: Diseño de planes matrices	33
7.4. Fase IV: Evaluación y escalabilidad	34
8. Fase I: Diagnóstico y acotamiento del problema	35
8.1. Análisis 6M	35
8.2. Levantamiento de información de la base de datos SAP y contexto actual de avisos	36
8.2.1. Distribución por categoría de trabajo	36
8.2.2. Distribución por ubicación técnica	37
8.2.3. Distribución actual de avisos de trabajo	37
8.2.4. Síntesis del levantamiento	39
8.3. Impacto en equipos y pérdidas de producción	40
8.3.1. Comparativa de producción: línea SAG vs. línea Convencional	40
8.3.2. Evaluación de vulnerabilidad y costos por restricción	41
8.4. Análisis de criticidad para la selección del tipo de línea	42
8.5. Síntesis de resultados y selección de línea	42
9. Fase II: Análisis de confiabilidad y riesgo en la red de piping de la molienda SAG	43
9.1. Definición del sistema piloto y delimitación de activos	43
9.1.1. Tramo 4: Bajada cuba, harnero y chute SAG	47
9.2. Aplicación de metodologías de evaluación de riesgos y criticidad.	49
9.2.1. Análisis FMEA para activos identificados	50
9.2.2. Evaluación de criticidad y jerarquización del riesgo	52
9.3. Tramo 4: Síntesis de riesgo y criticidad de activos	54
10.Fase III: Diseño de estrategias de mantenimiento y planes matrices	57
10.1. Criterios de diferenciación de estrategias según la naturaleza del riesgo	57
10.2. Definición de estrategias de mantenimiento	58
10.3. Estrategia de mantenimiento para ductos	58
10.4. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo guillotina	59
10.5. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo globo	60
10.6. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo mariposa	61
10.7. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo compuerta	62
10.8. Estrategia de mantenimiento para flujómetros electromagnéticos	62
10.9. Tramo 4: Síntesis de asignación de estrategias de mantenimiento	67
10.10Definición de planes matrices	70
10.11Planes matrices generales para ductos	71
10.12Planes matrices generales para válvulas de guillotina	73
10.13Planes matrices generales para válvulas de globo	74
10.14Planes matrices generales para válvulas de mariposa	76
10.15Planes matrices generales para válvulas de compuerta	77
10.16Planes matrices generales para flujómetros	79
10.17Tramo 4: Síntesis de planes matrices y recursos estimados	82
11.Fase IV: Evaluación del impacto esperado	84

11.1. Evaluación económica de la propuesta de estrategia de mantenimiento	84
11.1.1. Definición y estructura de costos de mantenimiento	84
11.1.2. Fundamento del Límite de Reparación Económica (ERL)	84
11.1.3. Matriz ERL con valores de mercado	85
11.2. Evaluación económica de los planes matrices	85
11.2.1. Estructura de Inversión	86
11.2.2. Beneficios y Costos Operacionales	86
11.2.3. Flujo de caja detallado	87
11.2.4. Análisis de Sensibilidad y Conclusión Financiera	88
11.3. Impacto esperado de los planes de mantenimiento	91
11.3.1. Incremento de la Confiabilidad Operacional (Reducción de la Tasa de Falla)	91
11.3.2. Recuperación de la Eficiencia Hidráulica	91
11.3.3. Optimización del costo del ciclo de vida	92
11.4. Hoja de ruta de escalabilidad	92
11.4.1. Fase 1: Estandarización y digitalización de planes matrices (Corto Plazo)	92
11.4.2. Fase 2: Expansión de planes matrices (Mediano Plazo)	93
11.4.3. Fase 3: Cultura de Mantenimiento (Largo Plazo - Continuo)	93
12. Conclusiones y Sugerencias	94
12.1. Sugerencias	94
12.2. Conclusiones	95
Bibliografía	96
A. Anexos	99
A.1. Activos críticos en el sistema de tuberías	99
A.2. Cálculo de la pérdida de capacidad de transporte	100
A.3. Impacto en equipos y pérdidas de producción	101
A.4. Tramo 3: Entrada túnel de servicio	104
A.5. Tramo 5: Bajada chute, MoBo1 y chute MoBo 2	105
A.6. Tramo 6: Bajada cuba MoBo1 y cuba MoBo 2	108
A.7. Análisis de criticidad a línea SAG y Convencional	110
B. Análisis de riesgo y criticidad aplicado a los tramos de la molienda SAG.	111
B.1. Tramo 5: Síntesis de riesgo y criticidad de activos	115
B.2. Tramo 6: Síntesis de riesgo y criticidad de activos	118
C. Definición de estrategias de mantenimiento específicas por tramo	120
D. Asignación de planes matrices específicos por tramos	126
E. Memoria de Cálculo Detallada – Evaluación Económica	130
E.1. Parámetros y estructura del modelo	130
E.2. Escenario Pesimista (Eficacia baja: 0,5 horas/año)	130
E.3. Escenario de Equilibrio (Eficacia mínima: 0,93 horas/año)	131
E.4. Escenario Base (Eficacia esperada: 1,0 hora/año)	131
E.5. Escenario Optimista (Eficacia alta: 2,0 horas/año)	132

Índice de figuras

1.	Logo Corporación Nacional del Cobre de Chile [3].	3
2.	Carta de valores corporativa de Codelco vigente desde 2024 [5].	4
3.	Vista satelital de la División Andina.	5
4.	Ubicaciones destacadas en altitud de la División Andina.	6
5.	Logo de la Superintendencia de Infraestructura.	7
6.	Organigrama general de la Superintendencia de Infraestructura.	8
7.	Modelo actual de gestión del mantenimiento en SiNFRA.	11
8.	Sistema Operativo de Mantenimiento de Codelco (SOMA).	12
9.	Estado actual de la gestión del mantenimiento en SiNFRA.	13
10.	Relación entre costos y niveles de mantenimiento.	14
11.	Carta Gantt asociada al desarrollo del plan de acción.	16
12.	Proceso de evaluación de riesgo según RBI.	19
13.	Gráfico de riesgo versus costos de inspección/mantención.	19
14.	Avisos M1 por tipo de trabajo.	36
15.	Avisos M1 por ubicación técnica.	37
16.	Mapa de calor de avisos por sector (septiembre 2025).	38
17.	Avisos por tipo de línea.	38
18.	Avisos por tipo de elemento del sistema de tuberías.	39
19.	Indicadores de eficiencia – Molienda SAG.	40
20.	Indicadores de eficiencia – Molienda Convencional.	41
21.	Diagrama de flujo de la molienda SAG.	44
22.	Plano planta concentradora chancado–molienda–flotación.	45
23.	Plano red de tuberías de agua de procesos – molienda SAG.	45
24.	Plano general de tramos seccionados en la molienda SAG.	46
25.	Tramo 4: Plano agua de procesos molienda SAG.	47
26.	Tramo 4: Diagrama de distribución de ductos, válvulas y flujómetros.	47
27.	Distribución de nivel de riesgo a la integridad (RBI-RBM) en ductos del Tramo 4.	54
28.	Perfil de criticidad funcional para instrumentación (flujómetros) en Tramo 4.	55
29.	Distribución de criticidad funcional y tipología de válvulas en Tramo 4.	55
30.	Distribución porcentual de estrategias de mantenimiento para ductos en el Tramo 4.	67
31.	Distribución porcentual de estrategias de mantenimiento para válvulas en el Tramo 4.	68
32.	Comparativa de intensidad de mantenimiento por subsistema (Anillo A vs. Anillo B).	69
33.	Distribución del esfuerzo de mantenimiento (HH) por tipo de estrategia en el Tramo 4.	82
34.	Demanda de recursos humanos por especialidad técnica en el Tramo 4.	83
A1.	Diagrama de flujos línea SAG.	101
A2.	Diagrama de flujos línea SAG molino de bolas 1 y 2.	102
A3.	Diagrama de flujos molienda convencional.	103
A4.	Tramo 3: Plano agua de procesos molienda SAG.	104
A5.	Tramo 3: Diagrama de distribución de ductos, válvulas y flujómetros.	104
A6.	Válvula VV01 - Tramo 3 anillo A SAG.	105
A7.	Tramo 5: Plano agua de procesos molienda SAG.	105
A8.	Tramo 5: Diagrama de distribución de ductos, válvulas y flujómetros.	106
A9.	Tramo 6: Plano agua de procesos molienda SAG.	108
A10.	Tramo 6: Diagrama de distribución de ductos, válvulas y flujómetros.	108
A11.	Distribución de nivel de riesgo a la integridad (RBI) en ductos del Tramo 5.	115

A12. Perfil de criticidad funcional para instrumentación (flujómetros) en Tramo 5. . .	115
A13. Distribución anidada de criticidad funcional (RCM) y tipología de válvulas en Tramo 5.	116
A14. Distribución de nivel de riesgo a la integridad (RBM) en ductos del Tramo 6. . .	118
A15. Perfil de criticidad funcional para instrumentación (flujómetros) en Tramo 6. . .	119
A16. Distribución anidada de criticidad funcional (RCM) y tipología de válvulas en Tramo 6.	119

Índice de tablas

1. Evaluación de Impacto por Categoría (P1, P2, P3, P4)	20
2. Puntaje de evaluación de consecuencias e indicador CoF.	20
3. Factor de daño según acumulación relativa y efectividad de inspección.	22
4. Conversión de PoF a categoría de frecuencia (adaptado de API 581).	23
5. Indicador ABC.	23
6. Matriz de Riesgo/Criticidad: Frecuencia (PoF) vs Consecuencia (CoF)	23
7. Frecuencia de ocurrencia de falla.	25
8. Diferencias fundamentales entre las metodologías RCM y RBI.	26
9. Estrategias de mantenimiento segun SOMA.	27
10. Clasificación de aguas según grado de dureza [17].	28
11. Cruce tipo de línea $\times$ tipo de elemento (avisos M1).	39
12. Pérdidas por evento de falla (comparativo SAG vs. Convencional).	41
13. Análisis de riesgo: línea SAG vs. línea Convencional (SOMA Fase B).	42
14. Ficha técnica - Molino SAG	44
15. Ficha técnica - Molino de Bolas.	44
16. Información general del mapa de la molienda SAG.	46
17. Tramo 4: Información técnica de ductos.	48
18. Tramo 4: Información técnica de válvulas.	48
19. Tramo 4: Información técnica de flujómetros.	49
20. Análisis FMEA para ductos de agua de proceso.	50
21. Análisis FMEA para flujómetros electromagnéticos.	50
22. Análisis FMEA para válvulas de guillotina.	51
23. Análisis FMEA para válvulas de control mariposa.	51
24. Análisis FMEA para válvulas manuales (globo y compuerta).	52
25. Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.	53
26. Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.	53
27. Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.	54
28. Tramo 4: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.	64
29. Tramo 4: Definición de estrategias de mantenimiento de flujómetros.	65
30. Tramo 4: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 1 de 3).	65
31. Tramo 4: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 2 de 3).	66
32. Tramo 4: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 3 de 3).	66
33. Tramo 4: Asignación de planes matrices de ductos.	80
34. Tramo 4: Asignación de planes matrices de flujómetros.	80
35. Tramo 4: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 1 de 3).	81
36. Tramo 4: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 2 de 3).	81
37. Tramo 4: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 3 de 3).	81

38.	Análisis de precios unitarios para intervención de activos	84
39.	Matriz de Decisión ERL aplicada a activos SAG	85
40.	Presupuesto de Inversión Inicial	86
41.	Flujo de caja económico proyectado (En miles de USD)	87
42.	Síntesis de indicadores económicos (escenario base)	89
43.	Sensibilidad de los indicadores financieros ante variaciones en disponibilidad ganada	90
44.	Ficha técnica - molino SAG	101
45.	Ficha técnica - molino de bolas 1 y 2.	102
46.	Ficha técnica - molino de barras 1,2,3.	103
47.	Ficha técnica - molinos de bolas 1 a 9.	103
48.	Tramo 3: Información técnica de ductos.	104
49.	Tramos 3: Información técnica de válvulas.	105
50.	Tramo 5: Información técnica de ductos.	106
51.	Tramo 5: Información técnica de válvulas.	107
52.	Tramo 5: Información técnica de flujómetros.	107
53.	Tramo 6: Información técnica de ductos.	108
54.	Tramo 6: Información técnica de válvulas.	109
55.	Tramo 6: Información técnica de flujómetros.	109
56.	Información técnica de ubicaciones a evaluar.	110
57.	Tramo 3: Determinación de consecuencias de fallas de ductos.	111
58.	Tramo 3: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.	111
59.	Tramo 3: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.	111
60.	Tramo 4: Determinación de consecuencia de fallas de ductos.	112
61.	Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.	112
62.	Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.	113
63.	Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.	113
64.	Tramo 5: Determinación de consecuencia de falla de ductos.	114
65.	Tramo 5: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.	114
66.	Tramo 5: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.	114
67.	Tramo 5: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.	114
68.	Tramo 6: Determinación de consecuencias de falla de ductos.	117
69.	Tramo 6: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.	117
70.	Tramo 6: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.	117
71.	Tramo 6: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.	117
72.	Tramo 3: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.	120
73.	Tramo 3: Definición de estrategias de mantenimiento de válvulas.	120
74.	Tramo 5: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.	121
75.	Tramo 5: Definición de estrategias de mantenimiento de flujómetros.	121
76.	Tramo 5: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 1 de 2).	122
77.	Tramo 5: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 2 de 2).	123
78.	Tramo 6: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.	124
79.	Tramo 6: Definición de estrategias de mantenimiento de flujómetros.	124
80.	Tramo 6: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 1 de 2).	125
81.	Tramo 6: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 2 de 2).	125
82.	Tramo 3: Asignación de planes matrices de ductos.	126
83.	Tramo 3: Asignación de planes matrices de válvulas.	126
84.	Tramo 5: Asignación de planes matrices de ductos.	126
85.	Tramo 5: Asignación de planes matrices de flujómetros.	126

86.	Tramo 5: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 1 de 2).	127
87.	Tramo 5: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 2 de 2).	127
88.	Tramo 6: Asignación de planes matrices de ductos.	128
89.	Tramo 6: Asignación de planes matrices de flujómetros.	128
90.	Tramo 6: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 1 de 2).	128
91.	Tramo 6: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 2 de 2).	129

1. Introducción

La minería del cobre a gran escala opera bajo altos estándares de exigencia productiva, que no admiten márgenes de error significativos en sus procesos críticos. Dentro del proceso de conminución, el molino SAG es el equipo que condiciona el ritmo de producción de la planta concentradora. No obstante, la operación continua de este activo depende directamente de la confiabilidad de sus sistemas de alimentación, siendo el suministro de agua de procesos uno de los sistemas más críticos para el transporte de pulpa y la eficiencia de la molienda.

En la unidad minera analizada en el presente estudio, ubicada en la Región de Valparaíso, se ha identificado una brecha relevante en la gestión de mantenimiento de la red de tuberías y válvulas que abastecen este proceso. Históricamente, estos activos han sido gestionados bajo un enfoque predominantemente correctivo. La experiencia operacional evidencia que la ocurrencia recurrente de fallas en válvulas de corte, obstrucciones por incrustación en ductos y fugas, genera pérdidas acumuladas de producción y un aumento en los costos de mantenimiento correctivo, afectando la continuidad operacional.

El presente trabajo de título, denominado Diseño de Estrategia de Mantenimiento Centrada en Riesgos para la Red de Tuberías del Agua de Procesos en la Molienda SAG, surge de la necesidad de reemplazar este enfoque reactivo por una estrategia de mantenimiento estructurada y basada en criterios técnicos. El problema abordado no es únicamente de carácter mecánico, sino también de gestión, asociado a la definición del momento óptimo de intervención sobre activos de gran tamaño y alto impacto operativo, tales como válvulas de gran diámetro y tramos críticos de tuberías que pueden restringir el caudal requerido por el proceso.

El objetivo general de esta memoria es diseñar un plan de mantenimiento que permita responder a estas problemáticas, asegurando la disponibilidad de la red de agua de procesos a un costo óptimo. Para ello, se desarrolla una metodología que contempla el levantamiento y catastro de los activos físicos, el análisis de modos de falla y efectos, la definición de planes matrices de mantenimiento y su correspondiente evaluación económica. El resultado de este trabajo entrega a la Superintendencia de Infraestructura una herramienta técnica para la toma de decisiones, orientada a mejorar la confiabilidad de la red y reducir la ocurrencia de fallas no planificadas mediante una gestión de activos basada en riesgos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Diseñar una estrategia de mantenimiento para una sección de la red de agua de procesos de la molienda SAG de la Planta Concentradora, utilizando metodologías de criticidad para gestionar el riesgo e integridad mecánica, establecer planes de mantenimiento y reducir costos de falla.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar la información histórica y actual de la base de datos mediante el software SAP y la cartera actual de avisos de trabajo no planificados de piping para definir los fluidos y redes de tuberías con más fallas.
- Realizar un análisis de criticidad e impacto económico para seleccionar el fluido y la red de tuberías más crítico con el propósito de implementar una estrategia de mantenimiento a sus activos.
- Realizar un levantamiento de la red de tuberías y sus activos presentes en la caverna de la molienda SAG estableciendo tramos, cantidad de ductos, válvulas y flujómetros.
- Utilizar metodologías de criticidad para definir la prioridad de los activos levantados dentro de los tramos establecidos.
- Estructurar un sistema de mantenimiento de ductos, válvulas y flujómetros para asegurar disponibilidad y confiabilidad considerando el estándar SOMA y normas asociadas a la integridad y confiabilidad.
- Proponer un roadmap para la implementación y escalamiento de matriz a otras redes de tuberías de la Planta Concentradora.

3. Información de la empresa

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, también conocida como Codelco, es una empresa estatal chilena fundada en el año 1976, dedicada al rubro minero del país [1]. Actualmente, es la principal productora de cobre a nivel mundial, con reservas que representan aproximadamente un 6 % de las reservas globales de este mineral [2]. Al primer semestre del año 2025, la corporación registra una producción de 643 mil toneladas de cobre y un aporte al fisco de 814 millones de dólares [3].

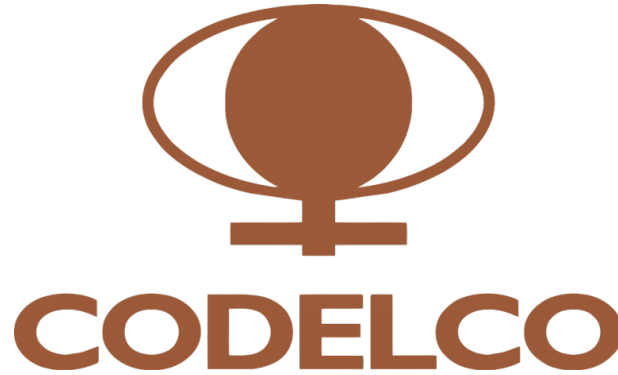


Figura 1: Logo Corporación Nacional del Cobre de Chile [3].

Codelco cuenta con ocho divisiones operativas distribuidas principalmente en el norte y centro del país, además de su Casa Matriz ubicada en Santiago, Región Metropolitana. Las divisiones que conforman la corporación son las siguientes:

- **División Chuquicamata:** Ubicada en Calama, Región de Antofagasta. Opera tanto a rajo abierto como de forma subterránea.
- **Radomiro Tomic:** Localizada en Calama, Región de Antofagasta. Corresponde a una mina a rajo abierto.
- **Ministro Hales:** Situada en Calama, Región de Antofagasta. Desarrolla operaciones a rajo abierto.
- **Gabriela Mistral:** Emplazada en Sierra Gorda, Región de Antofagasta. Mina a rajo abierto.
- **El Teniente:** Ubicada en la Región de O'Higgins. Es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del mundo.
- **Salvador:** Localizada en la Región de Atacama. Combina operaciones de minería subterránea y rajo abierto.
- **Ventanas:** Situada en la comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. Opera como fundición y refinería.
- **Casa Matriz:** Ubicada en la Región Metropolitana. Desde este centro se coordina la estrategia corporativa, dirigida por un directorio y el presidente ejecutivo de la empresa.

- **Andina:** Ubicada en la Región de Valparaíso, cercana a la comuna de Los Andes. Posee operaciones de mina subterránea y rajo abierto.

Durante el año 2024, Codelco alcanzó una producción total de 1.328.425 toneladas de cobre fino. En el mismo período, la corporación obtuvo un EBITDA de 5.439 millones de dólares, lo que representó un incremento cercano al 30 % respecto al año anterior. El indicador EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization) mide el desempeño operativo de una empresa, excluyendo los efectos de la estructura de financiamiento, la carga tributaria y las políticas contables asociadas a depreciaciones y amortizaciones, permitiendo una comparación objetiva de eficiencia operativa entre distintos períodos y empresas del sector.

La producción principal de Codelco corresponde al cobre, ya sea en forma de cátodos o lingotes con una pureza del 99,99 %. Adicionalmente, la empresa extrae y comercializa subproductos de alto valor económico, tales como oro, plata y molibdeno [4].

3.1. Propósito, misión y valores

Codelco define como propósito institucional “Ser pilar del desarrollo sostenible de Chile y el mundo” [4]. En el año 2024, la corporación actualizó su misión, reconociendo la necesidad de fortalecer la colaboración con actores externos de la industria y superar las limitaciones de los enfoques aislados. La misión vigente establece como objetivo “Maximizar el valor económico, ambiental y social de Codelco y su contribución al Estado de manera sostenible, a través de operaciones propias y asociaciones en minería de cobre, litio y sus subproductos” [4].

De manera complementaria, durante el mismo período se actualizó la carta de valores corporativos, alineándola con el quehacer operativo y estratégico de la empresa [5].



Figura 2: Carta de valores corporativa de Codelco vigente desde 2024 [5].

3.2. División Andina

La División Andina de Codelco se encuentra ubicada en la Región de Valparaíso, en la comuna de Los Andes, a aproximadamente 80 kilómetros al noreste de Santiago. Sus operaciones mineras se desarrollan entre los 3.700 y 4.200 m. s. n. m., e incluyen métodos de extracción a rajo abierto en el sector denominado “Sur Sur”, así como minería subterránea en el yacimiento Río Blanco [6].

En la Figura 3 se presenta una vista satelital de la división.



Figura 3: Vista satelital de la División Andina.

Dentro de las principales instalaciones que conforman el proceso productivo de la División Andina se encuentran la Mina Rajo (Traspaso), la Planta de Chancado, la Planta Concentradora y la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre (PMFC).

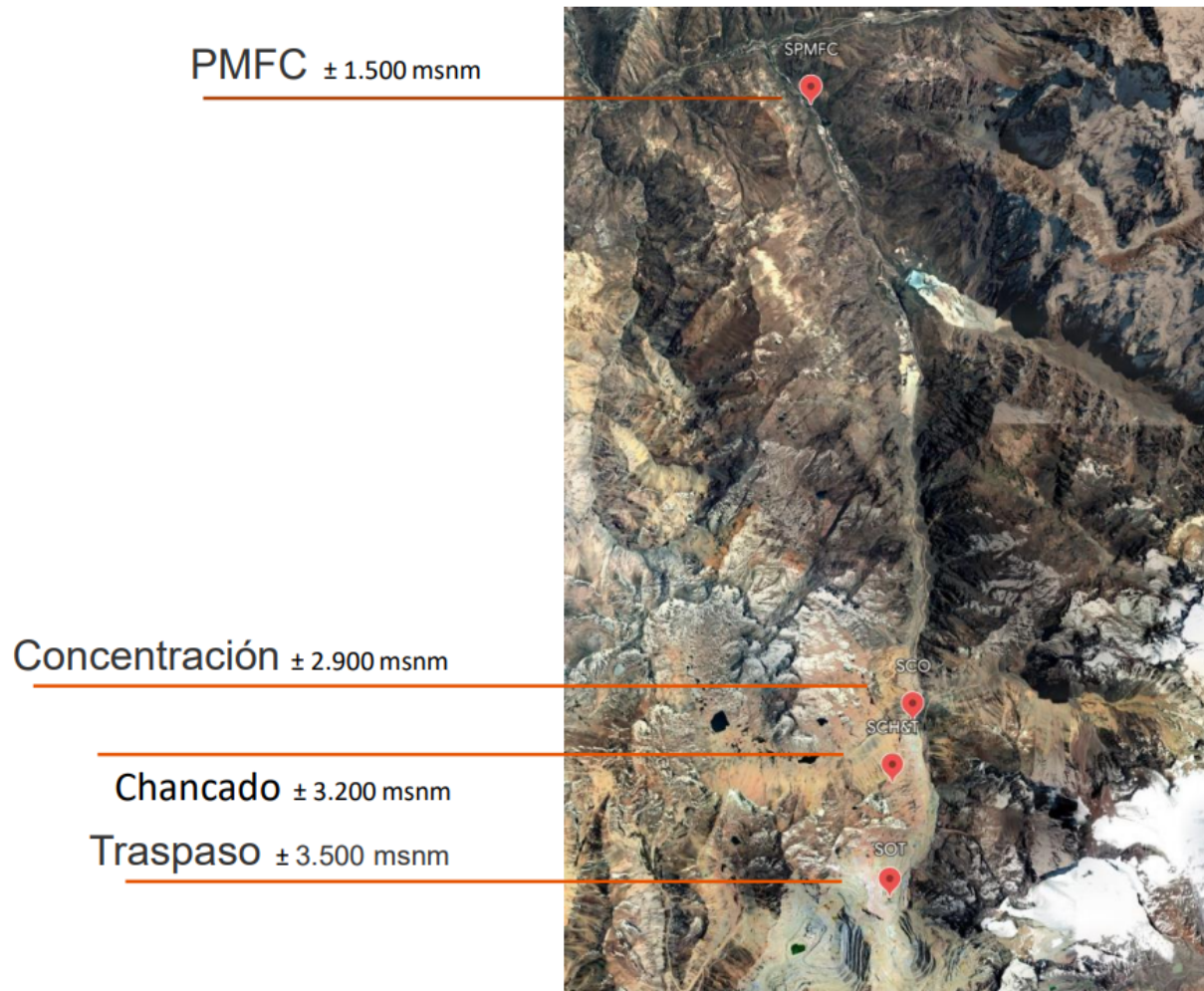


Figura 4: Ubicaciones destacadas en altitud de la División Andina.

Los principales productos obtenidos en la División Andina corresponden al concentrado de cobre, del cual se produjeron aproximadamente 181.600 toneladas durante el año 2024, las que fueron enviadas a fundiciones para su posterior refinación. Adicionalmente, se produjo molibdeno como subproducto del proceso, alcanzando una producción aproximada de 1.585 toneladas en el mismo período [7].

3.3. Superintendencia de Infraestructura

Actualmente, la División Andina cuenta con más de 55 años de operación, período en el cual se han alcanzado importantes metas productivas. En este contexto, los equipos mecánicos y operacionales críticos han sido gestionados históricamente mediante planes de mantenimiento preventivo y predictivo. Ejemplos de ello son los equipos LHD (Load Haul Dump), cuya vida útil aproximada es de 10 años, o los chancadores giratorios, los cuales son reemplazados en ciclos del orden de 20 años.

Por el contrario, la infraestructura minera ha presentado una tendencia histórica a recibir menores niveles de mantenimiento, debido principalmente a su extensa vida útil de diseño, cercana a los 50 años. Sin embargo, dadas las condiciones actuales de operación de la División Andina, surge la necesidad de intervenir de manera sistemática estructuras, vigas, plataformas, sistemas de piping y túneles subterráneos, con el objetivo de asegurar su integridad estructural y operacional.

En este contexto, y con el propósito de prevenir accidentes asociados al deterioro de la infraestructura, el 2 de enero del año 2023, bajo la Gerencia de Plantas (GPLAN), se creó la Superintendencia de Infraestructura, conocida por su acrónimo SiNFRA. Esta superintendencia es responsable de asegurar que las estructuras, plataformas, sistemas de piping y fortificaciones subterráneas sean inspeccionadas, reparadas y mantenidas, garantizando condiciones seguras para el desarrollo de las actividades operacionales.



Figura 5: Logo de la Superintendencia de Infraestructura.

El presente trabajo se enmarca dentro de esta superintendencia, cuyo alcance se extiende de manera transversal a todo el territorio de la División Andina. Actualmente, su estructura organizacional se presenta en la Figura 6.

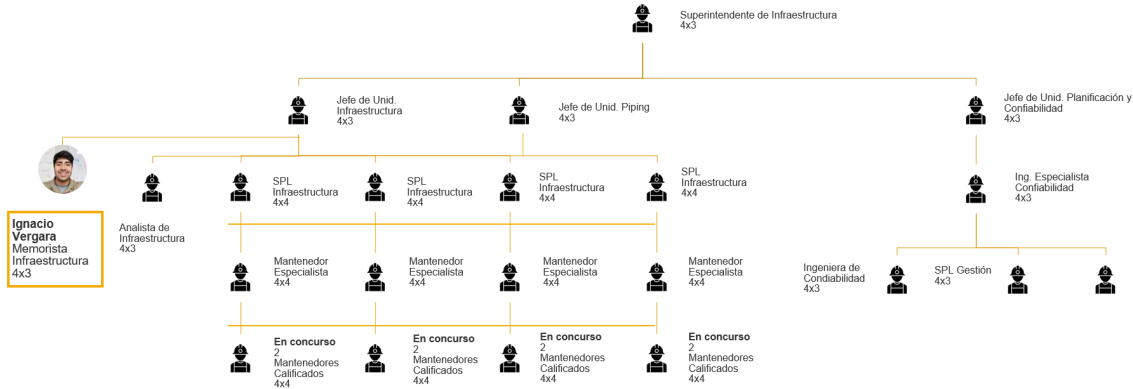


Figura 6: Organigrama general de la Superintendencia de Infraestructura.

En términos de dotación, la superintendencia cuenta con:

- **Dotación propia:** 25 trabajadores.
- **Colaboradores y contratistas:** 172 trabajadores.

La Superintendencia de Infraestructura constituye uno de los pilares fundamentales para la operación segura y continua de la División Andina. Su función es garantizar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de las estructuras, sistemas de piping y fortificaciones asociadas a los procesos productivos. Su gestión permite prevenir accidentes graves, reducir los tiempos de reparación, tanto planificados como no planificados, minimizar interrupciones operacionales y asegurar que los activos operen bajo condiciones estructurales adecuadas.

Entre las principales actividades desarrolladas por SiNFRA se incluyen:

- **Gestión de documentación e informes técnicos:**

El equipo gestiona y actualiza documentación técnica mediante sistemas de tipo ERP, utilizando principalmente SAP. Estas actividades incluyen informes de fallas, fichas técnicas de reparación, análisis de riesgos en el trabajo (ART), avisos de trabajo, control de indicadores de desempeño (KPI), estándares de seguridad, registros de mantenimiento y reportes de seguimiento. Esta labor requiere coordinación permanente con las áreas de planta, mantenimiento y seguridad, así como con empresas colaboradoras.

- **Inspección, modificación y fabricación de estructuras de tránsito peatonal y soporte de equipos:**

Se realizan inspecciones y diagnósticos de fallas estructurales mediante métodos convencionales y avanzados, tales como análisis de vibraciones, termografía y ultrasonido. Estas técnicas permiten anticipar fallas y planificar intervenciones de manera informada. Adicionalmente, se emplean drones para la inspección de zonas de difícil acceso, reduciendo la exposición del personal a riesgos elevados.

- **Inspección, modificación y fabricación de sistemas de piping:**

SiNFRA es responsable de la integridad estructural y operativa de las redes de tuberías que transportan fluidos críticos para el proceso productivo, tales como agua, aire, cal y reactivos químicos, excluyendo las tuberías de transporte de pulpa. Uno de los principales problemas asociados a estas redes corresponde a la formación de incrustaciones calcáreas, producto de los minerales presentes en los fluidos, las cuales reducen el diámetro efectivo de las tuberías y restringen el caudal.

- **Fortificación de túneles subterráneos:**

La superintendencia realiza evaluaciones del comportamiento de los túneles subterráneos mediante levantamientos geomecánicos. Actualmente se avanza en una planificación orientada a estandarizar los sistemas de fortificación, incorporando cuadrillas especializadas para establecer, a mediano plazo, un esquema de mantenimiento integral.

- **Supervisión de servicios externos:**

Debido a la magnitud de las operaciones, SiNFRA gestiona múltiples contratos de servicios industriales y de ingeniería ejecutados por empresas colaboradoras. La superintendencia supervisa y fiscaliza estas actividades, asegurando su cumplimiento con los estándares de calidad, seguridad y eficiencia definidos por Codelco.

3.3.1. Desafíos a resolver

El análisis histórico de la base de datos del sistema ERP SAP, junto con la revisión de registros de fallas y su impacto en la disponibilidad, ha permitido identificar desafíos relevantes en la gestión de las redes de piping, los cuales alimentan actualmente la cartera de avisos de trabajo no planificados.

- **Congelamiento de líneas de la red contra incendios**

Uno de los problemas recurrentes corresponde a la rotura de tuberías de la red contra incendios (RCI), producto de su exposición a temperaturas bajo los 0 °C, especialmente en el área de chancado. Estas condiciones generan el congelamiento del agua en su interior, provocando la expansión volumétrica del fluido y la falla de tramos, uniones y válvulas. Dado que estas líneas deben mantenerse permanentemente disponibles y el flujo permanece detenido, el riesgo de congelamiento se ve incrementado. Actualmente, se trabaja en la instalación de mantas calefactoras en puntos críticos, con el objetivo de mantener la temperatura del sistema dentro de rangos operacionales adecuados.

- **Roturas de líneas de transporte de cal**

La planta de cal constituye un activo crítico para la operación, ya que fallas en sus líneas de transporte pueden generar detenciones productivas. Para abordar esta problemática, la Vicepresidencia de Proyectos se encuentra ejecutando el desmantelamiento de la planta existente, mientras se opera con una planta móvil de contingencia y se desarrollan las ingenierías para la construcción de una nueva planta de cal.

- **Escasez de planes de mantenimiento en redes de agua de proceso**

La planta concentradora utiliza agua industrial, o agua de proceso, distribuida desde estanques ubicados en cotas elevadas, sin tratamientos avanzados. Este recurso contiene una elevada concentración de iones e impurezas que favorecen la formación de incrustaciones y procesos de corrosión, provocando desgaste y obstrucciones en las tuberías. Estas condiciones afectan válvulas, flujómetros e insertos, incrementando significativamente la generación de avisos de trabajo no planificados y los costos asociados a reparación y repuestos.

En este contexto, la Superintendencia de Infraestructura ha asignado al presente memorista el desarrollo de una estrategia de mantenimiento proactivo y la definición de un plan matriz para los activos de la red de agua de procesos. La propuesta se centra en una red piloto, con el objetivo de generar un modelo validado y escalable a otras redes críticas de la División Andina. La selección del sistema, fluido y zona de estudio será justificada a lo largo del desarrollo de la tesis mediante criterios técnicos y económicos.

4. Contexto del problema

La presente sección tiene por objetivo contextualizar el problema abordado en esta memoria, describiendo el entorno operacional actual y la problemática asociada a la gestión del mantenimiento de los sistemas de piping. El análisis se desarrolla desde una perspectiva general hasta la delimitación específica del problema, abordando el contexto operacional, los métodos actuales de gestión, las consecuencias de mantener el enfoque vigente y las oportunidades de mejora identificadas.

4.1. Contexto operacional

Desde su creación en el año 2023, la Superintendencia de Infraestructura (SiNFRA) asumió la supervisión transversal de los sistemas de piping de la planta concentradora, los cuales transportan fluidos críticos tales como agua de proceso y agua fresca, aire, cal, reactivos químicos, aceites y lubricantes. La disponibilidad y confiabilidad operacional de estas redes resulta fundamental para la continuidad del proceso de producción de cobre.

Actualmente, la gestión del mantenimiento en SiNFRA se desarrolla mediante un trabajo coordinado con otras gerencias de la División Andina, utilizando el sistema SAP como plataforma de apoyo para la planificación, gestión de materiales, historial de activos y control de órdenes de trabajo. El enfoque predominante se basa en planes de inspección orientados a la identificación de hallazgos en terreno, definidos como condiciones fuera del estándar de seguridad que representan un riesgo potencial para la operación.

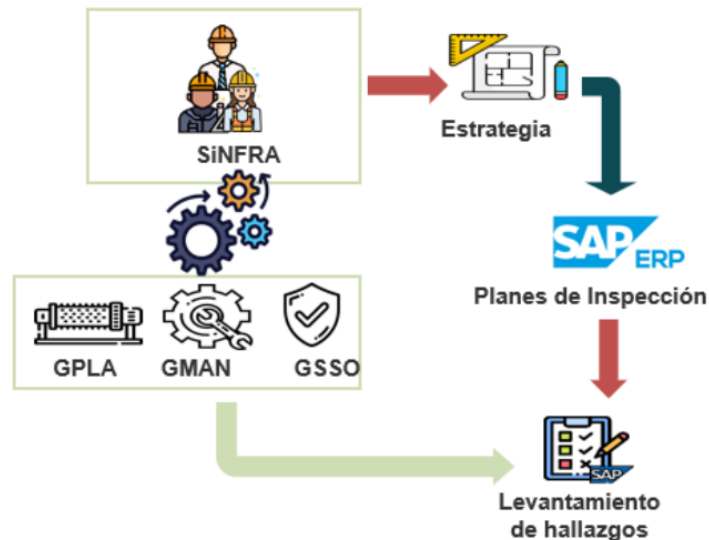


Figura 7: Modelo actual de gestión del mantenimiento en SiNFRA.

Cada hallazgo identificado da origen a un aviso de trabajo en SAP y, posteriormente, a una

orden de trabajo (OT), en la cual se especifican los recursos, horas hombre, materiales y costos necesarios para corregir la condición detectada [8, 9].

A septiembre de 2025, la Superintendencia de Infraestructura enfrenta un escenario caracterizado por un ciclo de mantenimiento predominantemente reactivo, el cual afecta la eficiencia y confiabilidad de los activos de piping. En este contexto, se mantiene una cartera aproximada de 150 avisos de trabajo pendientes asociados a tuberías. De acuerdo con la planificación vigente, la resolución completa de esta cartera podría extenderse por más de un año, mientras la generación continua de nuevos avisos perpetúa este ciclo de reactividad.

El problema central radica en la escasez de estrategias de mantenimiento específicas para las líneas de tuberías, las cuales carecen de procedimientos sistemáticos y estructurados de monitoreo, control y mantenimiento. Esta situación dificulta la evaluación del estado de los activos en el tiempo, compromete su integridad mecánica y limita la toma de decisiones informadas frente a fallas inesperadas.

En este contexto, la presente memoria propone contribuir al diseño de una estrategia de mantenimiento basada en el Sistema Operativo de Mantenimiento de Codelco (SOMA), incorporando metodologías orientadas a asegurar la integridad mecánica de los activos. El objetivo es transitar desde un enfoque reactivo hacia uno proactivo, priorizando riesgos, anticipando fallas y asegurando la confiabilidad operativa de los activos críticos dependientes de la red de tuberías.



Figura 8: Sistema Operativo de Mantenimiento de Codelco (SOMA).

El análisis se aplica de manera acotada a la red de tuberías de agua de procesos de la molienda SAG, dado que, tras el levantamiento de información y la evaluación técnico-económica realizada en la Fase I, esta red fue identificada como un sistema crítico para la continuidad operacional. Actualmente, dichos activos carecen de ubicaciones técnicas definidas y de planes matrices cargados en el sistema SAP, dificultando su gestión y mantenimiento.

Los principales problemas observados en la red de piping de agua de procesos corresponden a:

- **Incrustación:** Acumulación de compuestos minerales, principalmente carbonatos y sulfatos, en las superficies internas de las tuberías, lo que reduce el diámetro hidráulico efectivo, disminuye el caudal y afecta la eficiencia del sistema.

- **Fugas en válvulas y ductos:** Pérdida de estanqueidad producto del desgaste mecánico, generando pérdidas de agua, riesgos operacionales y mayores costos de mantenimiento correctivo.
- **Atascamiento de válvulas:** Problema recurrente en válvulas manuales expuestas a material particulado y suciedad, cuya falta de mantenimiento provoca la obstrucción de las partes móviles.
- **Pérdida de lectura en flujómetros:** Aislamiento de los electrodos por incrustaciones calcáreas en flujómetros electromagnéticos, lo que afecta la confiabilidad de las mediciones.

4.2. Métodos para afrontar actualmente la problemática

Actualmente, la gestión de las redes de tuberías en SiNFRA se basa principalmente en mantenimiento reactivo.

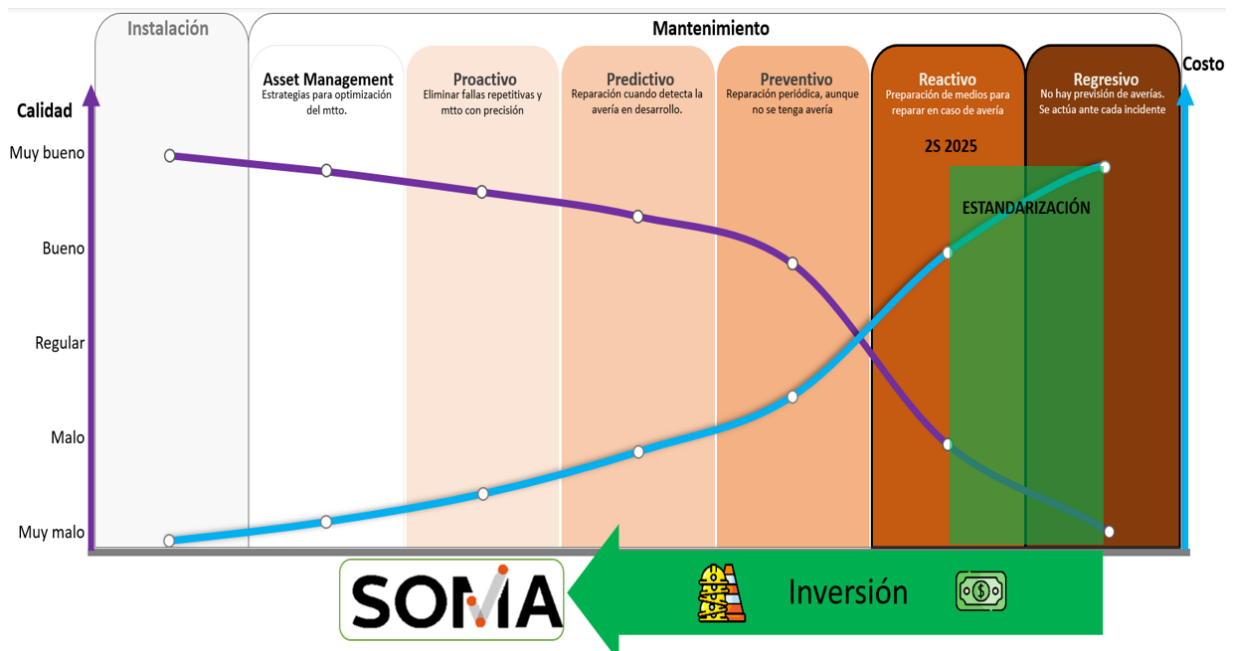


Figura 9: Estado actual de la gestión del mantenimiento en SiNFRA.

El mantenimiento reactivo, o correctivo, corresponde a las acciones ejecutadas para restaurar un activo a su condición operativa una vez ocurrida una falla. La ausencia de planes matrices específicos para piping provoca que las intervenciones se activen únicamente ante hallazgos o fallas visibles, incrementando la dependencia de inspecciones visuales y dificultando una gestión estructurada de los activos.

La red de tuberías de agua de procesos se encuentra bajo este enfoque, ya que su operación continua no permite intervenir mientras los equipos productivos están en funcionamiento, lo que conduce a que tuberías, válvulas y flujómetros operen hasta la falla.

4.3. Consecuencias asociadas a mantener el contexto operacional

Mantener una estrategia predominantemente reactiva en la gestión de piping genera consecuencias relevantes en distintas dimensiones:

- **Confiabilidad y disponibilidad operacional:** Las fallas no anticipadas reducen el caudal y la presión del agua, afectando la tasa de procesamiento, y aumentan el riesgo de fallas mayores y detenciones no programadas.
- **Impacto económico y de mantenimiento:** El mantenimiento reactivo implica costos significativamente superiores a los enfoques preventivos o predictivos. Además, la acumulación de avisos pendientes inmoviliza recursos y limita la gestión estratégica del mantenimiento.
- **Seguridad y logística:** La presencia de hallazgos no mitigados incrementa el riesgo de incidentes y la urgencia logística eleva la probabilidad de errores humanos, considerando además los plazos extendidos para la adquisición de repuestos críticos.

4.4. Oportunidad de mejora

La principal oportunidad de mejora consiste en migrar hacia un modelo de gestión de activos alineado con los principios del sistema SOMA, incorporando el mantenimiento basado en riesgos mediante estrategias preventivas y predictivas. Este enfoque permitiría aumentar la disponibilidad y confiabilidad de la red de agua de procesos de la molienda SAG, reducir la generación de avisos no planificados y disminuir los costos asociados a fallas.

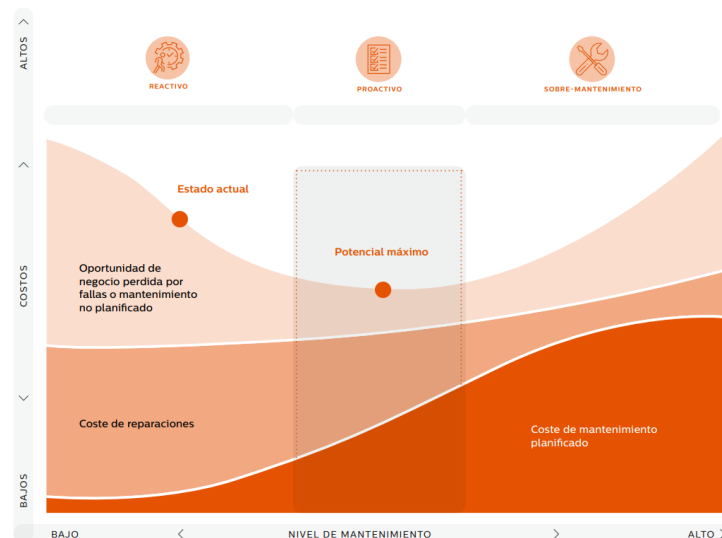


Figura 10: Relación entre costos y niveles de mantenimiento.

4.5. Propuesta de memoria

Esta memoria propone el diseño de una estrategia de mantenimiento para la red crítica de tuberías de agua de procesos de la molienda SAG, utilizando el estándar SOMA como marco metodológico. Se incorporan enfoques como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA) y la Inspección Basada en Riesgo (RBI).

El desarrollo considera inicialmente la trazabilidad de avisos y órdenes de trabajo asociados a piping, el análisis del impacto económico de la indisponibilidad de equipos críticos y un análisis de criticidad que permita seleccionar el sistema piloto. Posteriormente, se plantea la definición de una estrategia de mantenimiento y planes matrices para los activos asociados.

4.6. Delimitación y alcance del problema

El estudio se acota al diseño de planes matrices de mantenimiento para una sección crítica de la red de tuberías y sus activos asociados. A partir del análisis histórico de la base de datos SAP, se identificará la ubicación técnica con mayor recurrencia de avisos y se realizará el levantamiento detallado de los componentes del sistema seleccionado.

El resultado esperado corresponde a la documentación de planes matrices y la justificación de su impacto en la disponibilidad y confiabilidad operativa de la red de piping.

4.7. Situación futura deseada

La situación futura deseada contempla la implementación de un enfoque de mantenimiento proactivo mediante planes matrices, permitiendo reducir el riesgo de fallas y aumentar la confiabilidad de los activos de agua de procesos en la molienda SAG. Este enfoque busca establecer una hoja de ruta replicable a otras redes críticas de la planta concentradora.

4.8. Carta Gantt

La Carta Gantt presentada establece los plazos para cumplir los objetivos y el plan de acción de la memoria. Esta se estructura en cinco etapas, comenzando con la definición de objetivos y recopilación de información, para posteriormente desarrollar las Fases I, II, III y IV, las cuales se detallan en la sección de metodología.

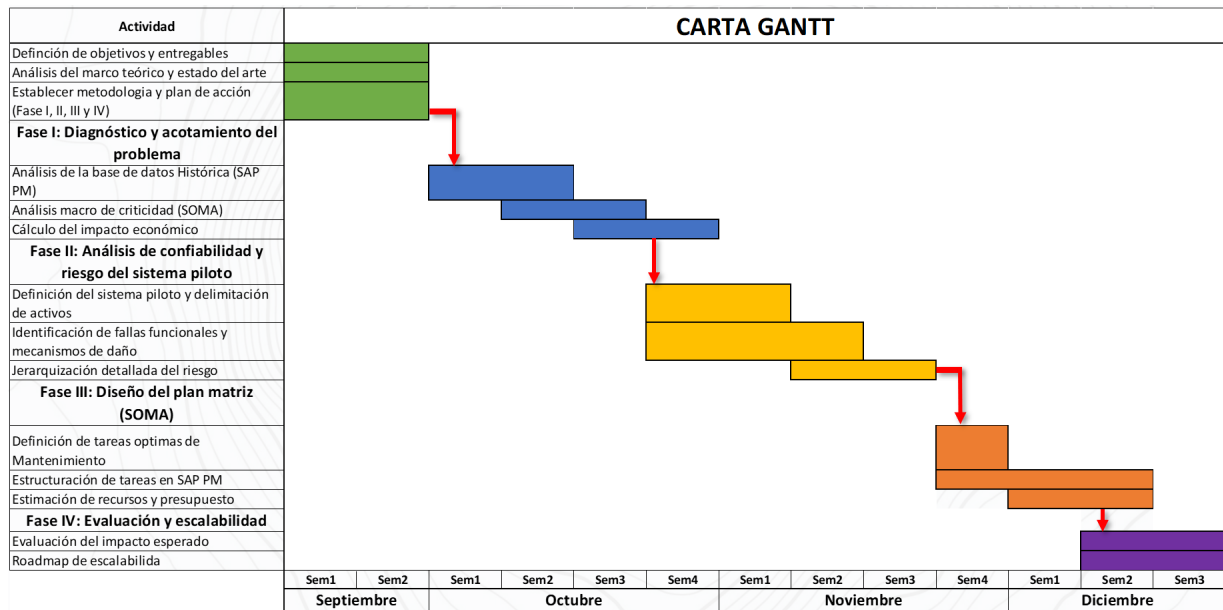


Figura 11: Carta Gantt asociada al desarrollo del plan de acción.

5. Marco Teórico

5.1. Sistema Operativo de Mantenimiento de Codelco

El Sistema Operativo de Mantenimiento de Codelco (SOMA) es el marco metodológico corporativo que estandariza la gestión del mantenimiento en todas las divisiones de la empresa. Su objetivo es asegurar la confiabilidad de los activos físicos, maximizar la disponibilidad operativa y reducir los costos de mantenimiento, dentro de un enfoque de mejora continua, seguridad y sostenibilidad ambiental [8]. SOMA se fundamenta en mejores prácticas de la industria y en metodologías reconocidas como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), además de la gestión de activos según normas internacionales como ISO 55000.

5.1.1. Estructura SOMA

SOMA se organiza en cinco capas jerárquicas para una implementación progresiva y sistemática:

- **Capa 0:** Principios rectores: uso obligatorio de SAP PM, mejora continua mediante C+, y estandarización de procesos.
- **Capa 1:** Ocho fases, desde la inversión (Fase A) hasta el post mantenimiento (Fase H), que incluyen análisis de criticidad, diseño de estrategias y ejecución.
- **Capa 2:** Cinco procesos: Identificación y Priorización, Planificación, Programación, Ejecución y Post Mantenimiento.
- **Capa 3:** Mapas de flujo y roles definidos para cada etapa del ciclo.
- **Capa 4:** Instrucciones detalladas para ejecutar tareas con calidad, seguridad y eficiencia [8].

5.1.2. Fases clave del SOMA

- **Fase B: Análisis de criticidad y metas de desempeño**
Clasifica los activos según su impacto en seguridad, medioambiente, producción y costos. La matriz de criticidad combina la frecuencia de falla con la consecuencia y genera un índice que clasifica los activos en alta (A), media (M) o baja (B) criticidad. Este índice se registra en SAP mediante el indicador ABC [8].
- **Fase C: Estrategia y plan matriz**
Define la estrategia de mantenimiento óptima para cada activo, considerando su criticidad. Las estrategias pueden ser:
 - **Preventivas:** basadas en tiempo o uso.
 - **Predictivas:** basadas en condición o analítica avanzada.
 - **Reactivas:** a la falla (solo aceptables para activos de baja criticidad).

El resultado es un plan matriz de mantenimiento cargado en SAP, con hojas de ruta, frecuencias, recursos y repuestos definidos [8].

■ **Fase D: Ciclo de mantenimiento**

Integra los procesos operativos del mantenimiento:

- Identificación y Priorización
- Planificación
- Programación
- Ejecución
- Post Mantenimiento

Cada proceso cuenta con responsables, entregables y reuniones periódicas para asegurar la adherencia al plan y fomentar la mejora continua [8].

5.2. Mantenimiento Centrado en Riesgos

Mientras que el RCM se enfoca en preservar la función del sistema, el Mantenimiento Centrado en Riesgos utiliza la Inspección Basada en Riesgo (RBI) para proporcionar un marco técnico-económico que gestiona la integridad de equipos estáticos sujetos a mecanismos de daño dependientes del tiempo, como la incrustación [22]. Bajo esta perspectiva, el mantenimiento deja de ser una actividad reactiva o puramente cíclica para convertirse en un proceso de gestión de la incertidumbre.

Como se establece en la filosofía del RBI, la esencia de este enfoque radica en que el riesgo no es estático; el riesgo es un indicador dinámico que permite identificar que una pequeña fracción de los activos (usualmente el 20 %) concentra la mayor parte del riesgo potencial (80 %) de la planta. Por tanto, permite una optimización radical de los recursos al desplazar los esfuerzos de mantenimiento desde equipos con baja probabilidad de falla o consecuencias menores, hacia aquellos elementos críticos donde la pérdida de integridad impactaría directamente en la continuidad operacional de la Molienda SAG.

El cálculo cuantitativo del riesgo, según el estándar API 581, se expresa como:

$$R(t) = PoF(t) \times CoF \quad (1)$$

Donde $R(t)$ representa el riesgo proyectado en el tiempo, $PoF(t)$ es la probabilidad de falla que aumenta con la cinética de la incrustación, y CoF es la consecuencia de falla. Este enfoque permite que la toma de decisiones sea racional y auditable, priorizando las inspecciones en función de la evolución real del daño y no de supuestos temporales genéricos. Al aplicar esta sinergia, se logra reducir la sobre-mantenimiento de activos de bajo riesgo y, simultáneamente, se mitiga la exposición a fallas catastróficas en la red de agua de procesos, alineándose con los objetivos de disponibilidad y seguridad de la industria minera moderna.

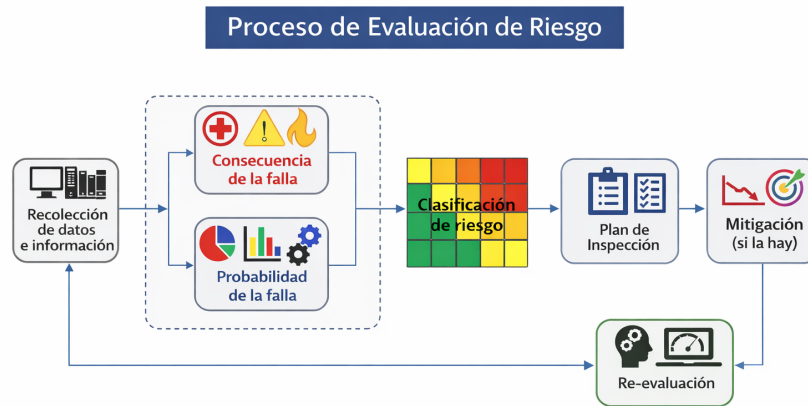


Figura 12: Proceso de evaluación de riesgo según RBI.

La figura 12 logrará ilustrar el proceso que se debe realizar para poder aplicar la metodología según la norma API581, aquí se esquematizan los pilares fundamentales para el despliegue de un programa de inspección basado en riesgo. Independientemente del grado de complejidad del análisis, cada etapa constituye un requisito para garantizar la trazabilidad y eficacia del RBI.

La transición entre un enfoque cualitativo, cuantitativo o semicuantitativo reside en la granularidad de la data recolectada y la profundidad de los algoritmos de cálculo empleados, lo que impacta directamente en la precisión de los intervalos de inspección proyectados.

Si estos pilares fundamentales son aplicados de manera correcta la metodología RBI asegura disminuir tanto los riesgos presentes en los activos, como los costos de mantenimiento asociados.

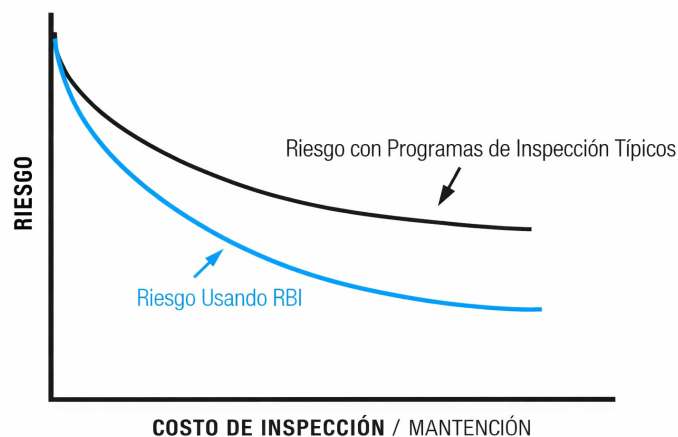


Figura 13: Gráfico de riesgo versus costos de inspección/mantenimiento.

Para determinar la consecuencia de falla (CoF), se debe utilizar la tabla 1, la cual indica las categorías a evaluar en el impacto del activo, estas son Seguridad, Medioambiente, Reducción de Tratamiento y Costos de Mantenimiento.

Tabla 1: Evaluación de Impacto por Categoría (P1, P2, P3, P4)

Fuente: Libro SOMA [8].

	P1: Seguridad	P2: Medioambiente	P3: Reducción de tratamiento	P4: Costos de mantenimiento
Definición	Consecuencias potenciales que podría tener una falla para la seguridad de las personas hasta las comunidades vecinas.	Consecuencias sobre el medioambiente en instalaciones de Codelco o en áreas próximas — para el aire, el agua y/o la tierra.	Pérdidas de producción o tratamiento que pueden ocurrir como consecuencias potenciales de una falla.	Costos de mantenimiento en los cuales se incurre para restituir la función afectada por la ocurrencia de la falla.
Evaluación de impacto	40 pts. Riesgo de accidente con fatalidad.	40 pts. Riesgo de daño medioambiental severo y de largo plazo.	12 pts. Pérdida de tratamiento total del equipo.	10 pts. Costos muy altos (sobre los US\$ 10.001).
	38 pts. Riesgo de accidente grave con discapacidad.	32 pts. Riesgo de daño de largo plazo.	8 pts. Reducción de tratamiento de gran impacto.	8 pts. Costos altos (entre US\$ 5.001 y US\$ 10.000).
	30 pts. Riesgo de accidente medio con lesión.	26 pts. Riesgo de daño de corto plazo.	4 pts. Reducción de tratamiento de mediano impacto.	5 pts. Costos medios (entre US\$ 1.001 y US\$ 5.000).
	12 pts. Riesgo de accidente mínimo con tiempo perdido.	10 pts. Riesgo de daño medioambiental menor.	2 pts. Reducción de tratamiento mínima.	2 pts. Costos bajos (entre US\$ 101 y US\$ 1.000).
	0 pts. Sin riesgo para las personas.	0 pts. Sin daño al medioambiente.	0 pts. Sin pérdidas de tratamiento.	1 pt. Costos muy bajos (Menos de US\$ 100).

Para calcular el valor final del impacto, es decir el puntaje de evaluación (PE) se deber realizar la sumatoria de cada uno de los puntos.

$$PE = \sum P_i = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (2)$$

En base al PE obtenido previamente se entra a la tabla de evaluación de consecuencias para obtener un puntaje del 1 a 6 de consecuencia de falla (CoF).

Tabla 2: Puntaje de evaluación de consecuencias e indicador CoF.

Fuente: Libro SOMA [8].

Puntaje de evaluación de consecuencias	Indicador de consecuencias
Consecuencia total sobre 38	6
Consecuencia total mayor o igual a 28 y menor a 38 o consecuencia en producción igual a 12	5
Consecuencia mayor o igual a 20 y menor a 28	4
Consecuencia mayor o igual a 10 y menor a 20	3
Consecuencia total mayor o igual a 4 y menor a 10	2
Consecuencia total inferior a 4	1

5.2.1. Adaptación de PoF de RBI para incrustación

API 581 se centra tradicionalmente en pérdida de contención (fugas por adelgazamiento de pared), pero el principio de riesgo es aplicable a la pérdida de capacidad de flujo por incrustaciones severas. En la molienda SAG, el daño predominante no es la pérdida de espesor metálico, sino la reducción del área hidráulica. Para esta memoria, se adapta el cálculo de PoF de API 581:

- En lugar de medir la tasa de corrosión (mm/año), se evalúa la **tasa de obstrucción**.
- La falla se define como **incapacidad funcional** de entregar el caudal requerido (falla funcional según RCM), y no como ruptura.

Para la jerarquización del riesgo en ductos se utiliza:

$$R(t) = PoF(t) \times CoF \quad (3)$$

donde el CoF se evalúa con los criterios del estándar SOMA previamente establecido, considerando el escenario más crítico y recurrente identificado en el FMEA (Tabla 2), y la PoF se determina así:

Probabilidad de falla (PoF). Adaptando API 581 (Parte 2), la probabilidad de falla anualizada:

$$PoF(t) = gff \times D_{f-incrust}(t) \times F_{MS} \quad (4)$$

Donde:

$$gff = 3,06 \times 10^{-5} \text{ [fallas/año] (Tabla 3.11 de API 581)}$$

$$F_{MS} = 1,0 \text{ (factor neutro).}$$

$$D_{f-incrust}(t) : \text{Mecanismo de factor de daño por incrustación.}$$

Modelo de incrustación en tuberías

Se emplean datos empíricos del monitoreo de agua de procesos (informe interno “Inhibidor de Incrustación SG 9735”): tasa base de acumulación de incrustación de 42,4 mg/día, equivalente a una tasa lineal de 0,024 mm/día [23]. La tasa de crecimiento anual (C_r) es:

$$C_r = 42,4 \left[\frac{\text{mg}}{\text{día}} \right] \approx 0,024 \left[\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right] \times 365 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \approx 8,76 \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right] \quad (5)$$

Se define el factor de Acumulación Relativa (Ar_t), porcentaje de holgura permisible consumida por la incrustación en un tiempo t :

$$Ar_t = \frac{C_r \times t}{d_{crit}} \quad (6)$$

donde $C_r = 8,76$ mm/año, t es el tiempo desde la última limpieza (años) y d_{crit} el espesor crítico de incrustación (50 mm).

Definición del espesor crítico (d_{crit}). Para definir el límite de falla funcional por obstrucción se adopta $d_{crit} = 50$ mm, en función del máximo de restricción admisible para el transporte hidráulico del sistema (flujo por gravedad presurizada desde el estanque TK SAG).

1) Geometría base. Tubería de acero al carbono de 24" (ASME B36.10M): $OD = 609,6$ mm; $t_w = 9,53$ mm (Schedule STD).

$$D_{int} = OD - 2t_w = 609,6 - 2(9,53) = 590,54 \text{ mm}$$

$$A_0 = \frac{\pi D_{int}^2}{4} \approx \frac{\pi(590,54)^2}{4} \approx 273,903 \text{ mm}^2$$

2) Reducción de área por incrustación. Con $d_{crit} = 50$ mm:

$$D_{eff} = D_{int} - 2d_{crit} = 590,54 - 100 = 490,54 \text{ mm}$$

$$A_{final} = \frac{\pi(490,54)^2}{4} \approx 188,997 \text{ mm}^2$$

$$\% \Delta A = \left(\frac{273,903 - 188,997}{273,903} \right) \cdot 100 \approx 31,0 \%$$

Impacto hidráulico en flujo por gravedad. El sistema TK SAG opera con carga hidráulica disponible (ΔH) fija. La capacidad de transporte (Q) se rige por el balance entre energía potencial y pérdidas de carga (h_f). Una incrustación de 50 mm:

1. reduce el área (A) en **31 %**, y
2. aumenta la fricción (λ) debido a la mayor rugosidad de la incrustación ($k_{incrust} \gg k_{acero}$).

Bajo carga constante, ambos efectos provocan una caída del caudal estimada superior al **40 %** respecto al diseño (ver Anexo A.2). Por ello, $d_{crit} = 50$ mm se valida como punto de **falla funcional por insuficiencia de caudal**.

Determinación del factor de daño ($D_{f-incrust}$). Se determina ingresando Ar_t en una tabla de efectividad de inspección adaptada de API 581:

Tabla 3: Factor de daño según acumulación relativa y efectividad de inspección.

Ar_t	E (Sin Insp.)	D (Baja)	C (Media)	B (Alta)
0.0–0.2	1	1	1	1
0.2–0.4	10	5	4	2
0.4–0.6	50	25	15	10
0.6–0.8	500	250	100	50
> 0,8	1000	800	500	250

Categorías de efectividad:

- **E (Inefectiva):** ausencia de inspección (crecimiento teórico de 8.76 mm/año).
- **D (Baja):** monitoreo indirecto de variables de proceso (presión/caudal).
- **C (Media):** inspección visual interna puntual (desmontaje de carretes/insertos).
- **B (Alta):** medición cuantitativa de espesor (END o videoscopia).

Con esto claro, ahora se puede evaluar con los valores ya definidos de la formula del PoF(t):

$$PoF(t) = gff \times D_{f-incrust}(t) \times F_{MS} \quad (7)$$

El valor obtenido para el PoF es una escala en un rango que establece la probabilidad de obstrucción en fallas al año, este valor se homologa a una categoría (1 a 5).

Tabla 4: Conversión de PoF a categoría de frecuencia (adaptado de API 581).

Cat.	Descripción	Rango (fallas/año)
1	Muy baja	$PoF \leq 3,06 \times 10^{-5}$
2	Baja	$3,06 \times 10^{-5} < PoF \leq 3,06 \times 10^{-4}$
3	Media	$3,06 \times 10^{-4} < PoF \leq 3,06 \times 10^{-3}$
4	Alta	$3,06 \times 10^{-3} < PoF \leq 3,06 \times 10^{-2}$
5	Muy alta	$PoF > 3,06 \times 10^{-2}$

El puntaje obtenido en la escala de frecuencia, se realiza el producto con la CoF y se introduce en la matriz de riesgo la cual tiene un rango de valores de 0 A 36 puntos asociados.

Donde:

Tabla 5: Indicador ABC.

Alto	
Medio	
Bajo	

Tabla 6: Matriz de Riesgo/Criticidad: Frecuencia (PoF) vs Consecuencia (CoF)

Fuente: Libro SOMA [8].

PoF \ CoF	1	2	3	4	5	6
6	6	12	18	24	30	36
5	5	10	15	20	25	30
4	4	8	12	16	20	24
3	3	6	9	12	15	18
2	2	4	6	8	10	12
1	1	2	3	4	5	6

Nota técnica sobre la adaptación: API 581 (Parte 2) no contempla explícitamente el mecanismo “obstrucción”. Se homologa con el módulo de *thinning* (adelgazamiento) aplicando la lógica de consumo de reserva al *área hidráulica disponible*. El uso de la Frecuencia Genérica ($gff = 3,06 \times 10^{-5}$) se adopta solo como **factor de escala estandarizado**. Aunque subestima la frecuencia absoluta real de obstrucción, preserva la coherencia matemática para la **jerarquización relativa del riesgo** sin alterar la escala logarítmica de la matriz. Para predicción de vida útil, el valor es referencial y cualitativo.

5.3. Mantenimiento centrado en confiabilidad

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una metodología estructurada destinada a asegurar que los activos físicos continúen cumpliendo sus funciones dentro de su contexto operativo. Estandarizada bajo la norma SAE JA1011, orienta la toma de decisiones desde la preservación del equipo hacia la preservación de la función del sistema [12]. Según Moubray (1997), el RCM permite transitar de un mantenimiento reactivo a uno proactivo mediante un proceso lógico basado en siete preguntas clave.

5.3.1. Proceso de las 7 preguntas

1. **Funciones y niveles de desempeño:** ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño? Se debe determinar qué se espera del activo en su contexto operativo. Las funciones se clasifican en:
 - **Funciones primarias:** propósito esencial del activo (capacidad, calidad, disponibilidad).
 - **Funciones secundarias:** expectativas adicionales (seguridad, contención, integridad estructural, cumplimiento normativo).
2. **Fallas funcionales:** ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones? Corresponde al estado en el que el activo es incapaz de cumplir una función bajo el nivel de desempeño aceptable. Incluye incapacidad total y fallas parciales (rendimiento inferior al estándar) [12].
3. **Modos de falla:** ¿Qué ocasiona cada falla funcional? Son los eventos específicos que causan la pérdida de función. Incluyen deterioro, desgaste, condiciones operativas, errores humanos o deficiencias de diseño. Es esencial identificar la causa raíz y no solo el síntoma [13].
4. **Efectos de la falla:** ¿Qué sucede cuando se produce la falla? Describe la evidencia observable y las consecuencias inmediatas del evento. Debe registrarse: evidencia física (alarmas, ruidos, fugas), amenazas a la seguridad y medioambiente, impacto en la producción y acciones correctivas necesarias [12].
5. **Consecuencias de la falla:** ¿De qué modo afecta cada falla? Clasifica las fallas según su impacto para priorizar decisiones [14]:
 - **Fallas ocultas:** no son evidentes por sí mismas (riesgo de fallas múltiples).
 - **Consecuencias de seguridad y medioambientales:** posibilidad de daño a personas o transgresión normativa.

- **Consecuencias operativas:** afectan la producción, calidad o costos operativos.
 - **Consecuencias no operativas:** implican solo el costo directo de reparación.
6. **Tareas proactivas:** ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir la falla? Actividades realizadas antes de la falla para mitigarla:
- **Tareas en condición (predictivo):** monitoreo para detectar fallas potenciales.
 - **Restauración programada:** reparación a intervalos fijos.
 - **Descarte programado:** sustitución a intervalos fijos [12].
7. **Acciones de *default*:** ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? Si no es técnica o económicamente viable una tarea proactiva, se recurre a:
- **Búsqueda de fallas:** verificación periódica de funciones ocultas.
 - **Rediseño:** modificación del sistema para reducir riesgo.
 - **Mantenimiento a la falla (run-to-failure):** aceptable solo si las consecuencias no son de seguridad o ambientales [13].

Aquí es clave considerar que la criticidad del activo se determina de mediante el producto de la Consecuencia de Falla (COF) con la Frecuencia de Falla (FF).

Conservando la forma de calcular el COF previamente explicado en la sección de RBI, RCM tiene un enfoque Cualitativo o Semicuantitativo.

Posteriormente, se debe considerar la frecuencia en la cual se producen fallas en el activo, lo que se evalúa mediante la siguiente tabla utilizando el criterio experto del personal de la empresa el cual tiene un enfoque al contexto operacional histórico de los activos evaluados.

Tabla 7: Frecuencia de ocurrencia de falla.

Fuente: Libro SOMA [8].

Frecuencia de ocurrencia de falla	Indicador de frecuencia
Ocurren fallas una vez al mes	6
Ocurren fallas una vez cada 6 meses	5
Ocurren fallas una vez al año	4
Ocurren fallas una vez cada 2 años	3
Ocurren fallas una vez cada 5 años	2
Ocurren fallas una vez cada 10 años	1

Finalmente se debe calcular el Índice de Criticidad, mediante la multiplicación de la frecuencia de falla por la consecuencia y así obtener el valor de la criticidad de 0 a 36 en el formato ABC (Alta, Media, Baja.) el cual se cruza con la matriz de criticidad.

$$IC(Riesgo) = (PoF)Frecuencia \cdot (CoF)Consecuencia \quad (8)$$

5.3.2. Complementariedad y Distinciones entre RCM y RBI

La principal diferencia entre ambas metodologías radica en su unidad de análisis y su naturaleza temporal. El RCM se centra en la **función del activo**, evaluando cómo los modos de falla afectan el proceso operativo; es una herramienta esencialmente de gestión de tareas para equipos activos y sistemas complejos. Por el contrario, el RBI se centra en la **integridad física**, analizando mecanismos de daño específicos (como la incrustación) en equipos estáticos. Mientras que la criticidad en RCM es a menudo una condición estática basada en el contexto operativo, el riesgo en RBI es dinámico y evoluciona en función de la cinética de degradación del material o el fluido.

En la Tabla 8 se resumen las diferencias fundamentales que sustentan la selección de ambas herramientas en esta memoria.

Tabla 8: Diferencias fundamentales entre las metodologías RCM y RBI.

Característica	RCM (SAE JA1011)	RBI (API 580/581)
Foco de Análisis	La función y el desempeño.	La integridad y el estado físico.
Tipo de Activo	Principalmente activos dinámicos.	Activos estáticos (tuberías/estanques).
Naturaleza del Daño	Fallas funcionales y eventos aleatorios.	Mecanismos de daño dependientes del tiempo.
Variable Crítica	Consecuencia de la pérdida de función.	Probabilidad de falla por degradación.
Resultado Típico	Plan de mantenimiento (tareas).	Plan de inspección (cuándo y dónde).

Aplicación Complementaria en la Red de Agua de Procesos En el desarrollo de esta estrategia, la integración de ambas metodologías se realiza de manera sinérgica para eliminar los puntos ciegos de un mantenimiento preventivo tradicional:

1. **El RCM como definidor de Consecuencia (CoF):** Se utiliza la lógica de las 7 preguntas para determinar el impacto real de la pérdida de flujo en la Molienda SAG. Esto asegura que la matriz de riesgo no sea solo un cálculo matemático, sino que refleje la criticidad operativa bajo el estándar SOMA.
2. **El RBI como definidor de Probabilidad (PoF):** Dado que la tubería es un equipo estático, el RBI modela la progresión de la incrustación. Esto permite transitar de un plan de limpieza fijo a uno basado en la condición, donde el $PoF(t)$ aumenta linealmente con la tasa de obstrucción identificada.

De este modo, el RCM establece los **umbrales de falla funcional** (caudal mínimo requerido), mientras que el RBI determina la **ventana de oportunidad** para la inspección y limpieza antes de que el riesgo supere los límites de tolerancia divisionales.

Ahora bien, una vez determinada el riesgo o criticidad del activo, SOMA nos permite seleccionar tanto la estrategia a aplicar como sus características principales las cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla.

La selección del tipo de mantenimiento esta ligado completamente al contexto operacional al cual se ve sometido el activo y su riesgo de falla o criticidad en la operación.

Tabla 9: Estrategias de mantenimiento segun SOMA.

Fuente: Libro SOMA [8].

Estrategia	Definición	Consideraciones - Características
Mantenimiento Preventivo	Estrategia que interviene el equipo periódicamente para inspeccionar y reemplazar componentes, aun cuando el equipo esté operando satisfactoriamente.	■ Mantenimiento basado en el tiempo (MBT): Los cambios se realizan en un intervalo de tiempo predeterminado (días, semanas, quincenas, meses o años), independiente del estado del componente. ■ Mantenimiento basado en uso (MBU): Los cambios se realizan en un intervalo de uso predeterminado (horas de operación, ciclos, toneladas pasadas, etc.), independiente del estado del componente. ■ Inspecciones: Rutina de inspección visual de activos o componentes para evaluar si es necesario intervenir para corregir anomalías detectadas.
Mantenimiento Predictivo	Estrategia de mantenimiento que busca anticiparse a la ocurrencia de las fallas a través del seguimiento de un síntoma o falla potencial y/o modelos de predicción estadísticos de analítica avanzada.	■ Mantenimiento basado en condición (MBC): Estrategia que mediante diversas tecnologías evalúa la condición física y su evolución, detectando síntomas que determinen la necesidad del mantenimiento. ■ Analítica avanzada: Estrategia basada en algoritmos de <i>Machine Learning</i> o <i>Deep Learning</i> para analizar grandes volúmenes de información, con el objetivo de descubrir patrones y predecir eventos de falla.
Mantenimiento Reactivo	Esta es una estrategia de mantenimiento donde se permite un modo de falla específico sin ningún intento de prevenirlo.	■ A la falla: Es una estrategia reactiva en la cual la pérdida de una función primaria o secundaria no genera mayor impacto operacional o de riesgo a las personas, medioambiente y comunidad.

5.4. Agua de procesos

El agua de procesos utilizada en la Planta Concentradora se considera *dura*. Los iones calcio y magnesio son los principales cationes bivalentes y constituyen cerca del 95 % de la *dureza del agua*, junto con otros aportes (hierro, manganeso, bario, etc.) [17]. Habitualmente, la dureza se expresa como mg/L de CaCO_3 . La OMS propone la clasificación de la Tabla 10 [17].

Tabla 10: Clasificación de aguas según grado de dureza [17].

CaCO_3 [mg/L]	Tipo de agua
0–60	Blanda
61–120	Moderadamente dura
121–180	Dura
>180	Muy dura

En Chile no existe límite normativo específico para dureza en agua de procesos mineros. La NCh 409 (agua potable) fija, por ejemplo, un límite para magnesio (125 mg/L) [18]. Como referencia internacional, algunos países consideran rangos máximos de 300–500 mg/L. En la Planta Concentradora se registran valores de calcio superiores a 600 mg/L y de magnesio cercanos a 35 mg/L. Estas características se originan por la recirculación del agua en el proceso y su contacto con el mineral, la cal y reactivos de flotación.

5.5. Mecanismos de deterioro dominantes en el agua de procesos en la molienda SAG

5.5.1. Incrustación de partículas calcáreas

La incrustación está directamente relacionada con la dureza del agua y se origina por la precipitación de sales poco solubles, como CaCO_3 , CaSO_4 , sílice (SiO_2) y otros minerales, debido a cambios en temperatura, presión o composición química. A partir de 200 mg/L de CaCO_3 , puede iniciarse la formación de incrustaciones en sistemas de tuberías. La descomposición térmica de bicarbonatos de calcio y magnesio elimina CO_2 disuelto y precipita carbonatos insolubles (CaCO_3), que se depositan en superficies internas. La composición típica está dominada por calcita [17].

El Índice de Saturación de Langelier (LSI) predice la tendencia a formar incrustaciones calcáreas:

$$LSI = pH - pH_s \quad (9)$$

LSI positivo indica sobresaturación respecto de CaCO_3 y alta probabilidad de incrustación; LSI negativo sugiere agua corrosiva. El pH_s depende de temperatura, conductividad, concentración de calcio y alcalinidad [19].

El Índice de Estabilidad de Ryznar (RSI) evalúa la tendencia a ser *incrustante* o *corrosiva*:

$$RSI = 2 \cdot pH_s - pH \quad (10)$$

con pH real medido y pH_s calculado a partir de alcalinidad, dureza cálcica, sólidos disueltos y temperatura. La interpretación es inversa a LSI:

- $RSI < 6$: agua fuertemente **incrustante**.
- $6 \leq RSI \leq 7$: **equilibrio aproximado**.
- $RSI > 7$: agua potencialmente **corrosiva**.

Estos índices son de uso extendido en ingeniería de aguas y han sido validados por organismos como la OMS [20].

Es importante distinguir la incrustación del *fouling* (ensuciamiento), que incluye materia orgánica/biológica o partículas suspendidas; la incrustación se refiere a precipitados inorgánicos poco solubles [20]. Sin control, las costras de carbonatos crecen en múltiples capas, son difíciles de remover mecánicamente y actúan como aislantes térmicos, reduciendo la transferencia de calor. En minería, disminuyen la capacidad de caudal, incrementan pérdidas de carga y aceleran desgaste, elevando costos operativos y de mantenimiento.

Métodos de limpieza e inhibición de incrustaciones en tuberías

Las soluciones aplicadas se agrupan en tres enfoques: métodos mecánicos, tratamientos químicos y tecnologías físicas no intrusivas.

- **Método mecánico a alta presión (hidrojet):** remoción física mediante agua a alta presión con boquillas que generan chorros capaces de desprender depósitos adheridos.

Principio: el impacto hidráulico y la energía cinética superan la resistencia mecánica de la incrustación, fragmentándola y expulsándola.

- **Inhibidores químicos de incrustación:** compuestos que interfieren la nucleación y crecimiento cristalino del CaCO_3 .

Principio: **Prevención:** fosfonatos y polímeros dispersantes se adsorben en núcleos de cristal, alterando su estructura y reduciendo adherencia (partículas en suspensión). **Remoción:** soluciones ácidas pasivadas disuelven calcita sin dañar el material base.

- **Dispositivos físicos inductores de frecuencia (no intrusivos):** modifican el comportamiento iónico del agua, evitando la formación de incrustaciones y promoviendo la desintegración de depósitos. No requieren contacto con el fluido ni adición de reactivos.

Principio: campos electromagnéticos o señales de baja frecuencia alteran la estructura cristalina del CaCO_3 , transformando calcita (estable e incrustante) en fases menos estables y no adherentes, reduciendo su precipitación sobre superficies internas y manteniendo partículas en suspensión hasta su evacuación.

6. Estado del arte

El mantenimiento de redes de piping en plantas concentradoras ha experimentado una evolución progresiva desde enfoques predominantemente correctivos hacia estrategias proactivas basadas en riesgos. Este cambio ha sido impulsado por la necesidad de aumentar la disponibilidad operacional, reducir costos asociados a fallas imprevistas y mitigar riesgos en sistemas que cumplen funciones críticas dentro del proceso productivo.

Las redes de tuberías en instalaciones mineras son esenciales para el transporte de fluidos tales como agua de proceso, cal, reactivos y aire. Su deterioro, ya sea por corrosión, incrustación, erosión o fatiga, puede derivar en fallas funcionales que impactan directamente la continuidad operacional. Diversos estudios clásicos y normativas técnicas, como los trabajos de Fontana (1986) y la práctica recomendada API RP 571 (2021), han caracterizado los mecanismos de daño más frecuentes en sistemas de piping industrial, destacando la relevancia del monitoreo continuo y del mantenimiento basado en condición para la gestión de estos activos.

En el caso de Codelco, el Sistema Operativo de Mantenimiento de Activos (SOMA) integra metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), la Inspección Basada en Riesgo (RBI) y los principios de la norma ISO 55000 en un marco corporativo común. Este sistema estandariza la gestión del mantenimiento en todas las divisiones de la compañía, estableciendo fases clave como el análisis de criticidad, el diseño de estrategias y la ejecución controlada de planes de mantenimiento, utilizando SAP PM como plataforma central de gestión.

6.1. Casos destacados en minería

La aplicación de estrategias de mantenimiento proactivo y predictivo en la industria minera ha demostrado resultados significativos en términos de confiabilidad, costos y seguridad operacional. Algunos casos relevantes reportados en la literatura y en experiencias industriales son los siguientes:

- **Codelco (Chile):** La implementación de mantenimiento predictivo apoyado en sensores y análisis de datos ha permitido reducir en torno a un 15 % las detenciones no programadas, además de generar mejoras en indicadores de eficiencia energética y confiabilidad de activos críticos [31].
- **Rio Tinto (Australia):** La incorporación de inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje automático en sus operaciones de minería de hierro ha contribuido a una reducción cercana al 30 % en los costos de mantenimiento y a un aumento aproximado del 20 % en la vida útil de los equipos [32].
- **Vale (Brasil):** En la mina de Carajás, el uso de mantenimiento predictivo permitió disminuir el tiempo de inactividad de equipos críticos en alrededor de un 25 %, mejorando la continuidad operacional del proceso [33].
- **Anglo American (Sudáfrica):** Mediante sistemas avanzados de monitoreo y análisis de condición, se logró detectar fallas potenciales con semanas de anticipación, incrementando los niveles de seguridad y reduciendo los costos operativos en aproximadamente un 20 % [34].

Estos casos evidencian que la adopción de enfoques basados en condición y riesgo resulta efectiva para la gestión de activos críticos en entornos mineros complejos.

6.2. Tecnologías emergentes para monitoreo basado en condición y mantenimiento basado en riesgo

El mantenimiento basado en condición (CBM) se sustenta en el uso de tecnologías que permiten evaluar el estado real de los activos de forma continua o periódica, anticipando fallas antes de que se manifiesten funcionalmente. Estas herramientas facilitan la optimización de recursos, la priorización de intervenciones y la reducción del riesgo operacional, especialmente en sistemas de piping donde los mecanismos de deterioro suelen ser progresivos.

6.3. Tecnologías aplicables a redes de piping

Entre las principales tecnologías utilizadas actualmente para el monitoreo y mantenimiento de redes de tuberías industriales, destacan las siguientes:

- **Sensores inteligentes (IoT):** Permiten medir variables como presión, temperatura, vibración, caudal y parámetros asociados a corrosión o incrustación, habilitando el monitoreo continuo y la generación de alertas automáticas [35].
- **Análisis de vibraciones y ultrasonido:** Técnicas ampliamente utilizadas para detectar desgaste mecánico, adelgazamiento de pared, picaduras y fugas incipientes en tuberías y accesorios [36].
- **Termografía infrarroja mediante drones:** Facilita la identificación de puntos calientes, pérdidas de energía y zonas con potencial de incrustación o deterioro, especialmente en sectores de difícil acceso [37].
- **Sistemas basados en inteligencia artificial y *machine learning*:** Analizan tendencias históricas y patrones operacionales para la predicción de fallas. Ejemplos de estas plataformas incluyen MineCare, Nesti 4.0 y Falcon [38, 39].
- **Fibra óptica estructural:** Tecnología utilizada para detectar deformaciones, vibraciones y variaciones térmicas en tiempo real, especialmente adecuada para tramos enterrados o de difícil inspección [40].
- **Sistemas SCADA e integración con SAP PM:** Permiten la visualización remota de variables de proceso y su vinculación directa con órdenes de trabajo y planes de mantenimiento, fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos [41].

La revisión de casos industriales y de tecnologías emergentes demuestra que la transición hacia estrategias de mantenimiento proactivo y basado en riesgos es técnicamente viable y pertinente en contextos operacionales complejos, como el de la Planta Concentradora de la División Andina. La recurrencia de fallas en redes de piping, particularmente en la línea de agua de procesos de la

molienda SAG, junto con la ausencia de planes matrices y ubicaciones técnicas adecuadamente definidas en SAP, configura un escenario que afecta directamente la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los activos.

En este contexto, la implementación de una estrategia de mantenimiento basada en riesgos y alineada con el estándar SOMA se presenta como una respuesta técnica coherente a las necesidades actuales de la Superintendencia de Infraestructura. La propuesta desarrollada en esta memoria busca establecer un modelo aplicable y escalable a otras redes críticas de la planta, contribuyendo a una gestión de activos más estructurada y orientada a la continuidad operacional.

7. Metodología

La metodología para el diseño de la estrategia de mantenimiento de tuberías críticas y sus activos se estructura en cuatro fases, integrando *Inspección Basada en Riesgo* (RBI), *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad* (RCM) y *Análisis de Modos de Falla y Efectos* (FMEA), utilizando el *Sistema Operativo de Mantenimiento de Codelco* (SOMA) como marco de referencia y SAP PM como plataforma de gestión e implementación.

7.1. Fase I: Diagnóstico y acotamiento del problema

- **Análisis de la base de datos histórica (SAP PM):** Identificar líneas y ubicaciones técnicas con mayor recurrencia y severidad de fallas (p. ej., avisos M1/M4), definiendo ventana temporal, criterios de filtrado y consistencia de datos.
- **Cálculo del impacto económico:** Cuantificar pérdidas de producción por indisponibilidad (lucro cesante) y por restricción hidráulica (merma de caudal), para priorizar el sistema más relevante.
- **Análisis de criticidad (SOMA):** Aplicar la matriz de criticidad (frecuencia de falla, PoF, versus consecuencia, CoF) para clasificar activos/ubicaciones (ABC) y seleccionar la red de tuberías piloto.

7.2. Fase II: Análisis de criticidad y priorización del sistema de tuberías seleccionado

- **Definición de la red y delimitación de activos:** Establecer límites físicos y funcionales del sistema (tramos, anillos) e inventario de componentes: tuberías (ductos), válvulas e instrumentación (flujómetros).
- **Identificación de fallas funcionales y modos de falla:** Desarrollar el FMEA para cada familia de activos, detallando fallas funcionales, modos de falla, causas raíces, efectos y controles; insumo para PoF/CoF.
- **Jerarquización detallada del riesgo:** Priorizar tramos y activos según su nivel de riesgo/criticidad. Para ductos, aplicar RBI adaptado a incrustación (pérdida de capacidad de flujo); para válvulas e instrumentación, priorizar por criticidad funcional conforme a RCM.

7.3. Fase III: Diseño de planes matrices

- **Estructuración de tareas de mantenimiento:** Formalizar planes matrices (preventivo, predictivo y correctivo) conforme a SOMA, definiendo hoja de ruta, frecuencias, puestos responsables (PTR/PTE), roles y especialidades, materiales y repuestos, clase de orden, prioridad y clase de actividad PM.

- **Estimación de recursos y presupuestos:** Determinar dotación (HH por especialidad), herramientas y equipos especializados, repuestos críticos, y costos asociados (CAPEX/OPEX) para la implementación y sostenibilidad del plan.

7.4. Fase IV: Evaluación y escalabilidad

- **Evaluación del impacto esperado:** Definir e implementar indicadores de desempeño (p. ej., reducción de avisos no planificados, disponibilidad ganada, costo por falla evitada) y metas asociadas.
- **Hoja de ruta de escalabilidad:** Diseñar criterios y etapas para replicar la metodología y los planes matrices en otras redes críticas de la Planta Concentradora, considerando requisitos de datos, criticidad, factibilidad operativa y recursos.

8. Fase I: Diagnóstico y acotamiento del problema

Para cumplir los objetivos de esta memoria y diseñar una estrategia de mantenimiento basada en riesgos para los sistemas de tuberías de la Planta Concentradora de la División Andina, se adopta una metodología estructurada conforme a SOMA, combinando *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), *Risk-Based Inspection* (RBI) y *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA).

El foco de la presente fase es fundamentar la selección de la red de agua de procesos de la molienda SAG como sistema piloto, a partir de: (i) análisis de la cartera de pendientes, (ii) evaluación económico-operacional asociada a su disponibilidad y (iii) criticidad conforme al estándar SOMA.

8.1. Análisis 6M

El análisis 6M permite identificar factores internos y externos que afectan la disponibilidad, confiabilidad y desempeño de los sistemas de tuberías:

1. Mediciones

- Instrumentación limitada en líneas de agua de proceso (presión, caudal, temperatura).
- Ausencia de puntos de control para detectar corrosión, pérdida de espesor o severidad de incrustación.
- Dependencia de inspecciones manuales y avisos reactivos en SAP.

2. Máquinas

- Tuberías y accesorios con desgaste por abrasión, corrosión e incrustación.
- Válvulas y bridas con recurrencia de fugas.
- Falta de estandarización en materiales y espesores, dificultando la reposición.

3. Mano de obra

- Dotación acotada para inspecciones preventivas, priorizándose correctivos.
- Brechas de capacitación en metodologías RBI y RCM.
- Sobrecarga administrativa en la gestión de avisos.

4. Métodos

- Ausencia de plan matriz preventivo para piping.
- Enfoque reactivo predominante (intervención sólo ante hallazgos en terreno).
- Falta de integración entre criticidad (PoF/CoF) y programación en SAP PM.

5. Medio ambiente

- Alta variabilidad térmica, humedad y exposición a agentes químicos.
- Riesgo ambiental por fugas (cal, reactivos, agua de proceso).

6. Materiales

- Uso de aceros al carbono sin protección interna en líneas críticas.
- Desgaste acelerado en codos y *tees* por turbulencia y sólidos en suspensión.
- Falta de trazabilidad de reemplazos y vida útil residual.

Este diagnóstico respalda la necesidad de migrar hacia una estrategia proactiva, integrando RBI, RCM y planes preventivos estandarizados para reducir la ocurrencia de fallas y mejorar la confiabilidad operacional.

8.2. Levantamiento de información de la base de datos SAP y contexto actual de avisos

Se realizó un levantamiento de las ubicaciones técnicas con mayor generación de avisos no planificados a partir de 2024, y se contrastó con la cartera de pendientes al mes de septiembre de 2025 (aprox. 150 avisos). Para la base histórica, se filtraron avisos **M1** (no planificados, creados por usuarios) y **M4** (generados automáticamente por el sistema).

8.2.1. Distribución por categoría de trabajo

Del filtrado inicial se obtuvieron 1.014 avisos M1. La Figura 14 resume la distribución por categoría.

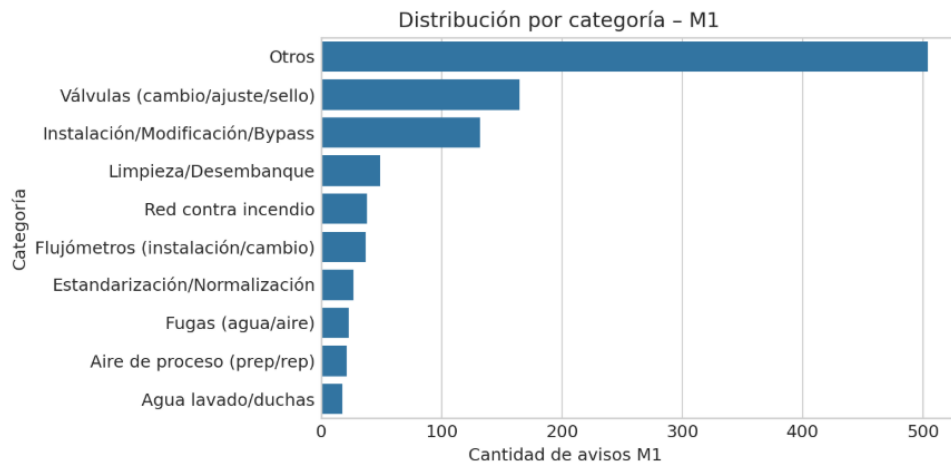


Figura 14: Avisos M1 por tipo de trabajo.

Se observan deficiencias de estandarización: la categoría **Otros** agrupa actividades que no se relacionan directamente con componentes específicos (p. ej., ajustes menores, modificaciones, soportación, preparaciones), dificultando la planificación preventiva y añadiendo variabilidad. En conjunto, representan una carga significativa sobre la dotación.

El análisis muestra que la mayor carga proviene de intervenciones en *válvulas* (16,3 %) y obras de instalación/modificación/*bypass* de *piping* (13,0 %). Para *flujómetros* es menor (3,6 %) y dispersa, frecuentemente ligada a condiciones de instalación y accesibilidad. Un 49,7 % corresponde a casos heterogéneos (Otros), lo que sugiere oportunidades de mejora en descripciones y codificación en SAP.

8.2.2. Distribución por ubicación técnica

Las ubicaciones técnicas se definen por niveles (1 a 7). Dado el cambio organizacional de 2024, coexisten **ANSI** (Andina Suministro e Infraestructura) y **ANCO** (Andina Concentrador) en el nivel 1, convergiendo en molienda SAG/Convencional en niveles subsiguientes. La Figura 15 muestra la distribución de avisos M1 por ubicación técnica.

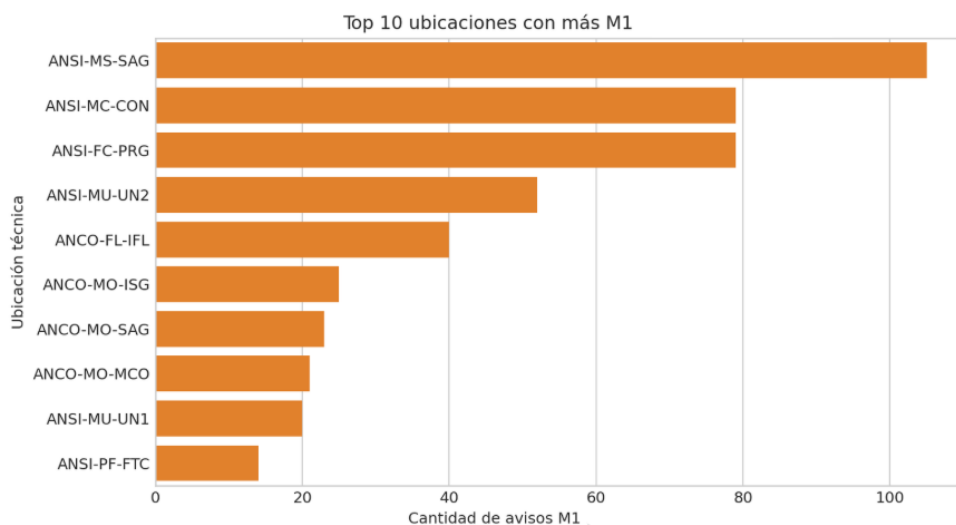


Figura 15: Avisos M1 por ubicación técnica.

La mayor concentración se presenta en Molienda SAG (10,4 %) y Molienda Convencional (7,8 %), que suman 18,2 % del total. SAG exhibe además la mayor fracción asociada a válvulas/caudalímetros (20 %), seguido por Convencional (15,2 %). Se recomienda priorizar el despliegue del plan matriz en ANCO-MO-SAG o ANCO-MO-MCO.

8.2.3. Distribución actual de avisos de trabajo

Para septiembre de 2025, el mapa de calor de la Figura 16 evidencia que los sectores de molienda (SAG, Convencional, MUN1, MUN2) concentran 85 de los 150 avisos totales, incluyendo 9 de alta criticidad.

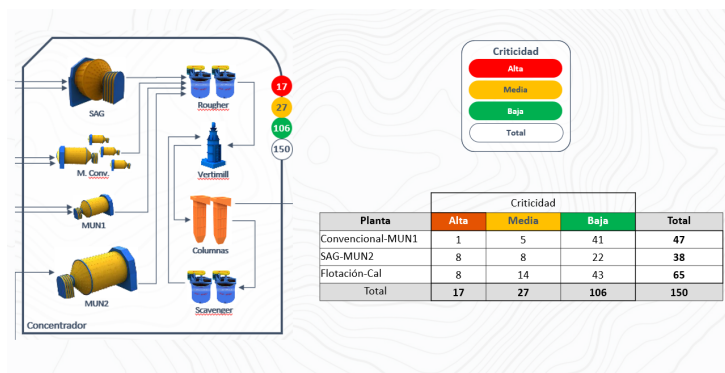


Figura 16: Mapa de calor de avisos por sector (septiembre 2025).

Tipos de líneas La Figura 17 muestra que *agua de proceso* concentra 40 avisos (25 %), seguida por *agua de instrumentos* (12,5 %) y *agua sello* (11,2 %).



Figura 17: Avisos por tipo de línea.

Tipos de elementos En la Figura 18 destacan *cañerías* (28,1 %) y *válvulas* (21,9 %), seguidos por *flujómetros* (8,8 %). Estas tres familias superan el 50 % del total, lo que orienta la necesidad de planes matrices específicos.

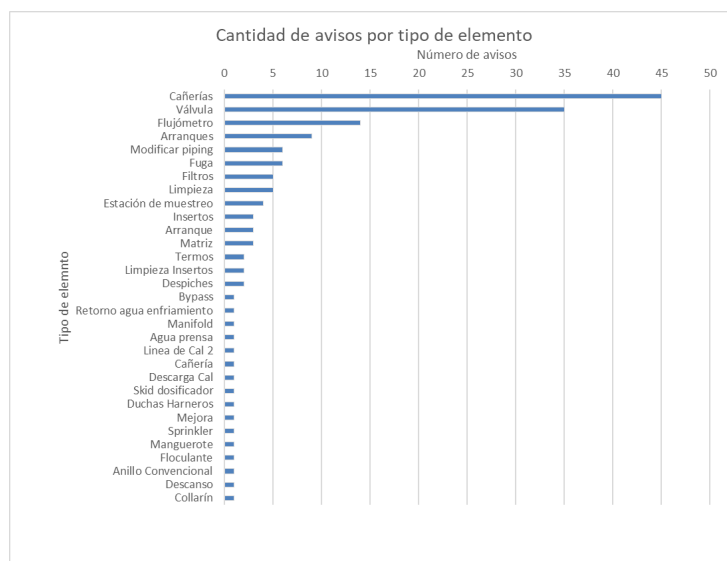


Figura 18: Avisos por tipo de elemento del sistema de tuberías.

Cruce línea × elemento La Tabla 11 resume el cruce entre tipos de línea y elementos. *Agua de proceso* con *válvulas* concentra 18 avisos; *agua sello* con *flujómetros*, 12 avisos. Este patrón orienta planes para válvulas (sellos, torque, soportación) y flujómetros (instalación, EPD/calibración).

Tabla 11: Cruce tipo de línea × tipo de elemento (avisos M1).

Tipo de línea/Elemento	Agua prensa	Anillo Convencional	Arranque	Arranques	Bypass	Cañería	Cañerías	Collarín	Descanso	Descarga Cal	Despiches	Duchas Harneros	Estación de muestreo	Filtros	Floculante	Flujómetro	Fuga	Insertos	Limpieza	Limpieza Insertos	Línea de Cal 2	Manguerote	Manifold	Matriz	Mejora	Modificar piping	Retorno agua enfriamiento	Skid dosificador	Sprinkler	Termos	Válvula		
Agua Enfriamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agua Fresca	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	
Agua Laundry	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	
Agua Lavado	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Agua Manguerote	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agua Muestras	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Agua Prensa	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agua Proceso	0	1	0	8	0	1	2	0	0	0	0	1	0	4	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	18
Agua Sello	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agua Claras	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Aire Celdas Columnas	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Aire IR	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Aire Instrumentos	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	6	0	0	0	0	0	4	
Aire Instrumentos	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Aire Planta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Alta Presión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Alta presión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cal	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	
Concentrado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lubricación	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
BCI	0	0	0	0	0	0	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Reactivos	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	

8.2.4. Síntesis del levantamiento

La evidencia empírica (base histórica y cartera vigente) indica que *agua de proceso* y sus accesorios constituyen la principal fuente de avisos tanto en SAG como en Convencional. Para consolidar la priorización, se aplicará la Fase B de SOMA (criticidad PoF/CoF) y se definirá la ubicación prioritaria para la implementación de la estrategia de mantenimiento [8].

8.3. Impacto en equipos y pérdidas de producción

Se cuantifica el impacto económico ante falla de suministro de agua de procesos, con el fin de discriminar la línea productiva de mayor incidencia (SAG vs. Convencional). La información técnica de equipos se detalla en el Anexo A.3.

8.3.1. Comparativa de producción: línea SAG vs. línea Convencional

El lucro cesante por hora de detención se estima a partir del precio del cobre, leyes de mineral y capacidad de tratamiento:

$$C_F \left(\frac{\text{TMCF}}{\text{hr}} \right) = L_C \times L_R \times T_p \quad (11)$$

donde L_C es la ley de cobre (0,81 % promedio divisional), L_R la ley de recuperación (85 % promedio divisional) y T_p las toneladas procesadas por hora.

Estimación para línea SAG Con base en indicadores de eficiencia plan (P0 2025) y datos reales (abril), se obtiene:

MSAG	P02025	Acumulado Real	Mes Real
Total	100%	100%	100%
Mtto. Planificado	13%	10%	22%
Mtto. Correctivo	2%	3%	4%
Disponibilidad	85%	87%	74%
Det. Operacionales	4%	6%	5%
Utilización	81%	82%	69%
Pérdidas por Rend.	14%	10%	8%
OEE	67%	71%	62%
Rendimiento (tph)	1661	1660	1786

Figura 19: Indicadores de eficiencia – Molienda SAG.

$$T_{p,\text{SAG}} = 1786 \text{ [tph]}, \quad C_{F,\text{SAG}} = 0,0081 \cdot 0,85 \cdot 1786 \approx 12,30 \text{ [TMCF/hr]}$$

MCONV	P02025	Acumulado Real	Mes Real
Total	100%	100%	100%
Mtto. Planificado	15%	6%	14%
Mtto. Correctivo	2%	5%	5%
Disponibilidad	83%	89%	81%
Det. Operacionales	2%	6%	10%
Utilización	81%	83%	72%
Pérdidas por Rend.	2%	7%	5%
OEE	79%	76%	67%
Rendimiento (tph)	1403	1281	1328

Figura 20: Indicadores de eficiencia – Molienda Convencional.

Estimación para línea Convencional

$$T_{p,Conv} = 1328 \text{ [tph]}, \quad C_{F,Conv} = 0,0081 \cdot 0,85 \cdot 1328 \approx 9,14 \text{ [TMCF/hr]}$$

Valorización económica Se utiliza el precio del cobre proyectado por Cochilco para 2024–2025 [7]:

$$\text{Precio Cu} = 421,6 \left[\frac{\text{cUS\$}}{\text{lb}} \right] = 4,216 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right]$$

y la conversión 1 TM = 2,204,62 lb. Así,

$$\text{Lucro Cesante SAG} \approx (12,30 \cdot 2,204,62) \cdot 4,216 \approx \mathbf{114,325} \text{ [US$/hr]}$$

$$\text{Lucro Cesante Convencional} \approx (9,14 \cdot 2,204,62) \cdot 4,216 \approx \mathbf{84,953} \text{ [US$/hr]}$$

Tabla 12: Pérdidas por evento de falla (comparativo SAG vs. Convencional).

Línea	Proc. [tph]	Cu Fino [TMCF/hr]	Pérdida [US\$/hr]
Molienda SAG	1786	12.30	114,325
Molienda Convencional	1328	9.14	84,953

La Tabla 12 confirma mayor impacto económico ante falla en la línea SAG; por ello, el plan de mantenimiento se focaliza estratégicamente en la red de agua del SAG.

8.3.2. Evaluación de vulnerabilidad y costos por restricción

Además del escenario de falla catastrófica, la operación actual presenta una **pérdida continua** por restricción hidráulica. El sistema de alimentación al SAG opera en condición de contingencia ($N-1$) por inoperatividad del Anillo A (incrustación, fallas de válvulas), transformando al Anillo B en *punto único de falla* y operando con restricción de diámetro.

Costo por restricción hidráulica (pérdida validada). Datos de enero–marzo 2024 evidencian una merma promedio de 300 tph, acumulando:

$$\text{Pérdida Trimestral (Ene–Mar 2024)} \approx 185,255 \text{ [TMS]} \approx \mathbf{7,7} \text{ MUSD}$$

Esto confirma la incrustación como un **costo activo** del orden de **2.5 MUSD mensuales**, no sólo como riesgo potencial.

8.4. Análisis de criticidad para la selección del tipo de línea

Se aplica el estándar SOMA (Fase B) para evaluar criticidad por ubicación técnica, considerando base histórica de órdenes de trabajo (costos por reparación, cambio de válvulas, limpiezas) y HH empleadas. Con apoyo del equipo de SiNFRA se asignan puntajes por categoría (P1–P4) y se calcula el riesgo ($PoF \times CoF$) y el indicador ABC.

Tabla 13: Análisis de riesgo: línea SAG vs. línea Convencional (SOMA Fase B).

Ubicación técnica	Cant.	PoF	P1	P2	P3	P4	CoF	Valor riesgo	Nivel
ANCO–MO–ISG–LAP	N/A	3	0	0	8	5	3	6	Medio
ANCO–MO–IMC–LAP	N/A	2	0	0	4	5	2	4	Bajo

8.5. Síntesis de resultados y selección de línea

Se selecciona la red de agua de procesos de la **molienda SAG** para el desarrollo de los planes matrices. La decisión se fundamenta en: (i) alta generación de avisos, (ii) riesgo *medio* (SOMA) y (iii) mayor impacto económico ante falla. La ejecución de una estrategia proactiva en esta red permitirá validar la metodología y establecer un modelo replicable para otras redes críticas de la planta.

9. Fase II: Análisis de confiabilidad y riesgo en la red de piping de la molienda SAG

Esta fase tiene por objetivo transformar los datos de fallas históricas (Fase I) en información útil para la toma de decisiones, identificando y priorizando los modos de deterioro que afectan a los activos críticos de la red de agua de procesos de la molienda SAG. Para ello, se aplica rigurosamente el estándar SOMA, en conjunto con las metodologías RBI y RCM.

9.1. Definición del sistema piloto y delimitación de activos

En esta sección se establecen los límites físicos y la composición del sistema de tuberías seleccionado (agua de proceso en la molienda SAG), delimitando con precisión los componentes sobre los cuales recaerá la estrategia de mantenimiento. La correcta acotación de los activos es fundamental para garantizar que el plan resultante sea específico y aplicable en terreno. La elección se justifica por su criticidad operacional, evidenciada por la alta incidencia de avisos de mantenimiento no planificado y su impacto económico potencial en la producción.

La Figura 21 presenta el diagrama de flujo general de la línea SAG. El proceso productivo se inicia en las tolvas de alimentación; el mineral es transportado por correas principales (p. ej., A9) hacia los equipos de conminución (SAG y molinos de bolas), los que requieren un suministro constante de agua de proceso para formar la pulpa. Esta pulpa es posteriormente bombeada por equipos centrífugos hacia hidrociclones, donde se realiza la separación de sólidos y líquidos por acción centrífuga.

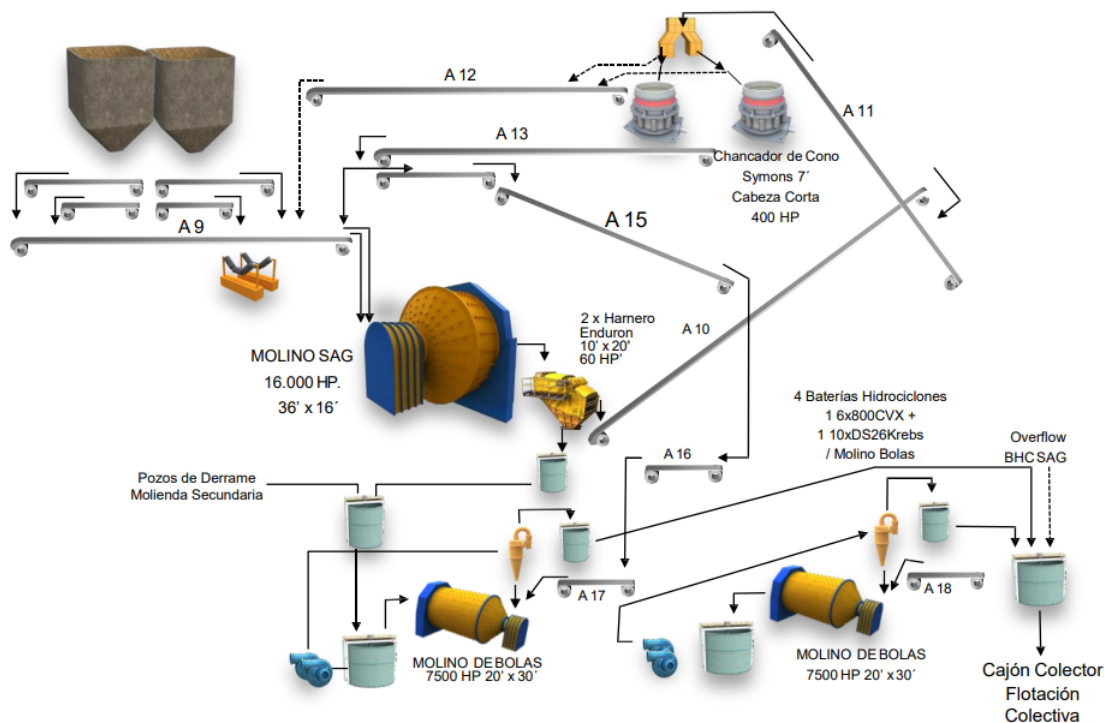


Figura 21: Diagrama de flujo de la molienda SAG.

Fuente: Libro Full Potencial Codelco [10].

Tabla 14: Ficha técnica - Molino SAG

Fuente: Libro Full Potencial [10].

Característica	Valor
Marca	Siemens
Cantidad	1
Dimensiones	4,88 m x 10,92 m
Potencia	16.000 HP
Rendimiento	2.011 tph

Tabla 15: Ficha técnica - Molino de Bolas.

Fuente: Libro Full Potencial [10].

Característica	Valor
Marca	Svedalla
Cantidad	1
Dimensiones	6,10 m x 9,14 m
Potencia	7.500 HP
Rendimiento	1.006 tph

A nivel general, el plano de agua de proceso de la planta (chancado–molienda–flotación) se acota para delimitar la zona específica donde se aplicará la estrategia de mantenimiento.

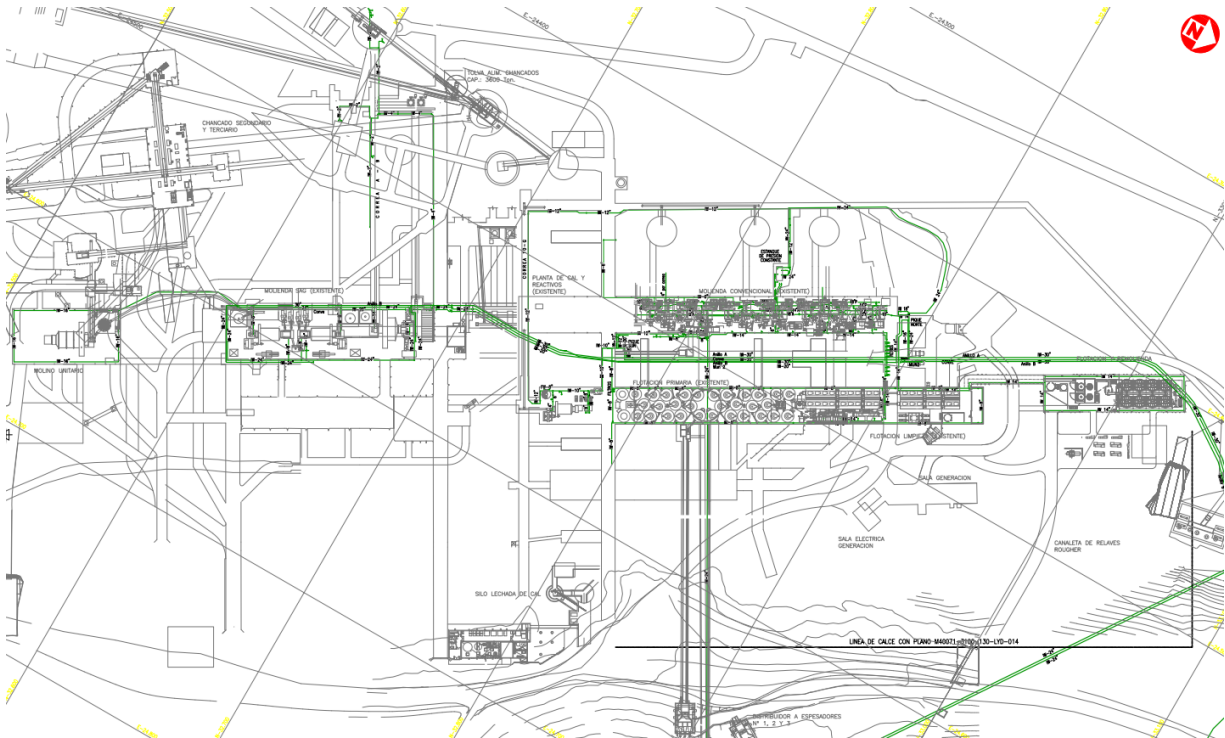


Figura 22: Plano planta concentradora chancado–molienda–flotación.

Fuente: Base de datos SiNFRA.

Para identificar con mayor precisión la red que se utilizará como sistema piloto, se realiza un acercamiento a la molienda SAG, obteniendo una visión general de la distribución de tuberías en el área (Figura 23).

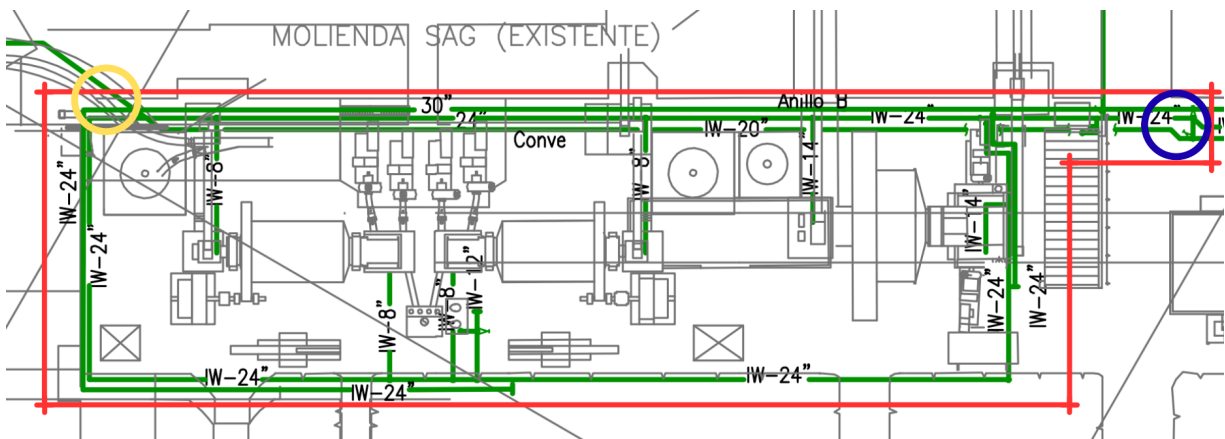


Figura 23: Plano red de tuberías de agua de procesos – molienda SAG.

Fluido de servicio	Agua de procesos
Punto de Inicio	Entrada túnel de servicio – Planta SAG
Punto de término	Salida hacia MUN2
Zona delimitada	Molienda SAG

Tabla 16: Información general del mapa de la molienda SAG.

Dentro del área delimitada se realizará la trazabilidad y el levantamiento de activos presentes en la red de agua de procesos. Para ordenar la información, se definieron tramos dentro de la molienda SAG, con apoyo del personal de la Superintendencia de Infraestructura.

El agua de procesos, proveniente del estanque TK SAG, se distribuye inicialmente por túneles subterráneos hacia la molienda a través de tres tuberías de 30 pulgadas, correspondientes a:

1. **Anillo A SAG**
2. **Anillo B SAG**
3. **Línea Convencional**

Dado que el análisis se enfoca en el SAG, la línea Convencional y sus accesorios (derivación a MUN2) no serán considerados salvo que incidan directamente en la red seleccionada.

Los tramos definidos según ubicación y equipos alimentados son:

- **Tramo 3:** Entrada del túnel de servicio a Planta SAG.
- **Tramo 4:** Bajadas de la cuba, harnero y chute del molino SAG.
- **Tramo 5:** Bajadas del chute MoBo 1 y chute MoBo 2.
- **Tramo 6:** Bajadas de la cuba MoBo 1 y cuba MoBo 2.

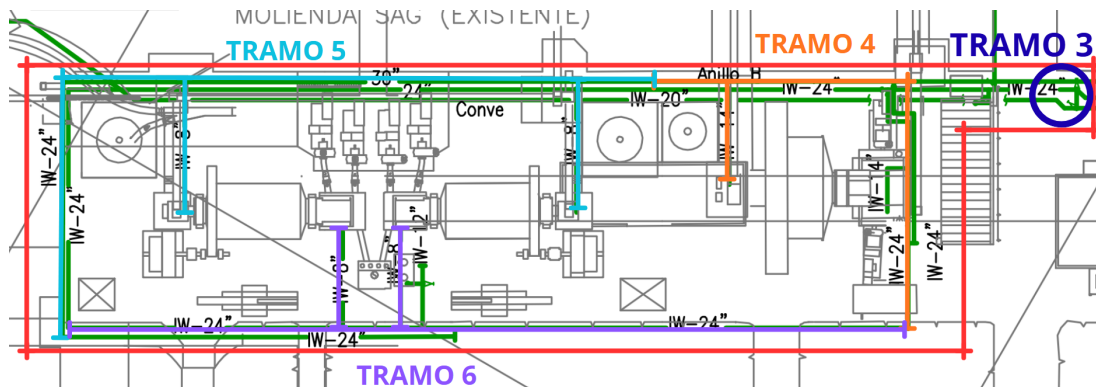


Figura 24: Plano general de tramos seccionados en la molienda SAG.

El alcance de este trabajo comprende los tramos 3 a 6. Los tramos 1 y 2 se ubican aguas arriba respecto de la molienda SAG. Para ilustrar la información contenida en cada tramo, se presenta a continuación el **Tramo 4** (plano, distribución de ductos/válvulas/fluómetros y listado de activos). La trazabilidad completa de los activos desde el tramo 3 al 6 se encuentra en el Anexo A.8.

9.1.1. Tramo 4: Bajada cuba, harnero y chute SAG

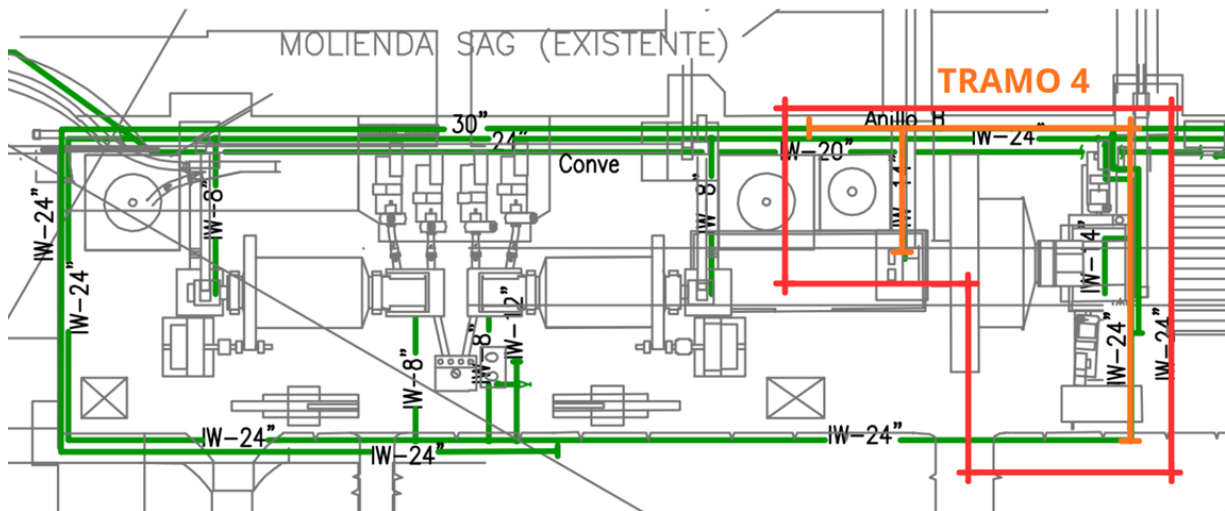


Figura 25: Tramo 4: Plano agua de procesos molienda SAG.

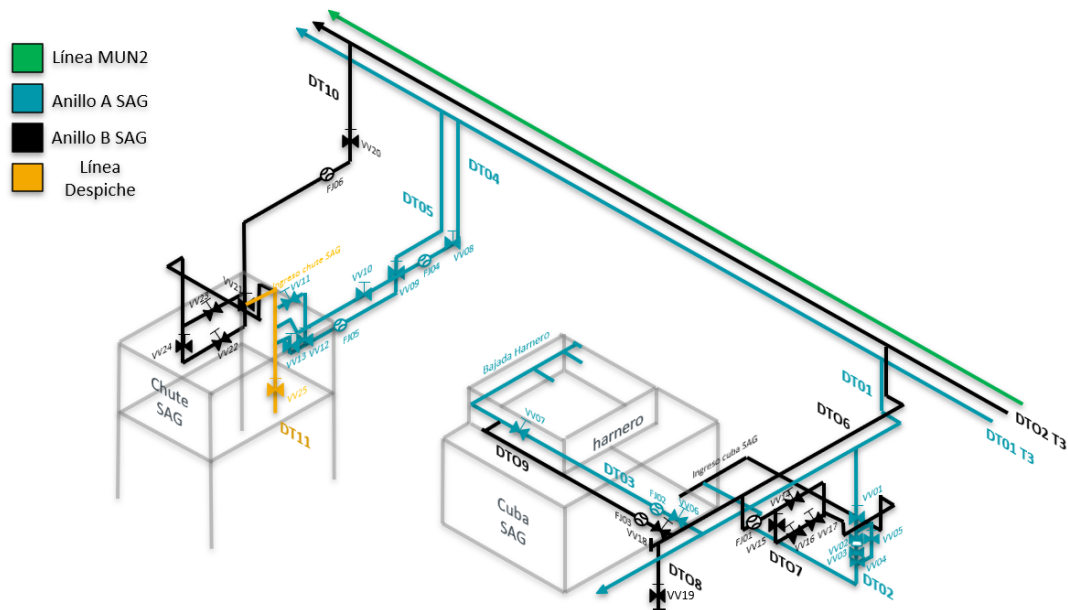


Figura 26: Tramo 4: Diagrama de distribución de ductos, válvulas y fluómetros.

Tabla 17: Tramo 4: Información técnica de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro
Anillo A	DT01	Acero Carbono	24"
	DT02	Acero Carbono	10"
	DT03	Acero Carbono	10" $\rightarrow$ 8"
	DT04	Acero Carbono	16" $\rightarrow$ 14"
	DT05	Acero Carbono	14"
Anillo B	DT06	Acero Carbono	24"
	DT07	Acero Carbono	10"
	DT08	Acero Carbono	8"
	DT09	Acero Carbono	10" $\rightarrow$ 8"
	DT10	Acero Carbono	16"
	DT11	Acero Carbono	14" $\rightarrow$ 8"

Tabla 18: Tramo 4: Información técnica de válvulas.

Línea	Ducto	Válvula	Tipo	Diámetro
Anillo A	DT02	VV01	Guillotina neumática	10"
		VV02	Guillotina neumática	10"
		VV03	Guillotina neumática	10"
		VV04	Control Mariposa	10"
		VV05	Guillotina neumática	10"
	DT03	VV06	Guillotina neumática	10"
		VV07	Guillotina neumática	8"
	DT04	VV08	Guillotina neumática	14"
	DT05	VV09	Compuerta	14"
	DT04	VV10	Guillotina neumática	14"
	DT05	VV11	Compuerta	14"
		VV12	Compuerta	14"
		VV13	Compuerta	14"
Anillo B	DT07	VV14	Globo	10"
		VV15	Guillotina neumática	10"
		VV16	Guillotina neumática	10"
		VV17	Mariposa motorizada	10"
	DT09	VV18	Guillotina neumática	10"
	DT08	VV19	Guillotina neumática	8"
		VV20	Guillotina neumática	16"
		VV21	Guillotina neumática	16"
		VV22	Mariposa motorizada	16"
		VV23	Compuerta	16"
		VV24	Guillotina neumática	16"
		VV25	Guillotina neumática	16"

Tabla 19: Tramo 4: Información técnica de flujómetros.

Línea	Ducto	Flujómetro	Diámetro
Anillo A	DT03	FJ02	10"
	DT04	FJ04	14"
	DT05	FJ05	14"
Anillo B	DT07	FJ01	10"
	DT09	FJ03	10"
	DT10	FJ06	16"

9.2. Aplicación de metodologías de evaluación de riesgos y criticidad.

El objetivo de esta fase es transformar la información de fallas históricas y la descripción de los activos a ingeniería de mantenimiento centrada en riesgos que permita seleccionar las tareas proactivas óptimas, siguiendo metodologías y estándares de mantenimiento.

Dado que el propósito de la gestión de activos es mitigar los riesgos derivados de las fallas, la implementación de un Mantenimiento Basado en Riesgo garantiza una estrategia alineada con dichas metas. Este enfoque se sustenta en la técnica del análisis de riesgos, la cual permite identificar, caracterizar y cuantificar la pérdida asociada a un evento mediante la integración de la probabilidad de falla y el análisis de sus consecuencias.

Por lo que para el presente análisis de criticidad se aplicará RBI para los ductos identificados en las líneas de tuberías en la molienda SAG, ya que esta estrategia tiene por objetivo reducir el riesgo general de fallas catastróficas de tuberías.

Si bien la metodología RBI (API 581) se utiliza principalmente para gestionar la integridad estructural (contención), en este plan de mantenimiento se ha adoptado un enfoque híbrido. Se aplicará el análisis de Riesgo (RBI) para priorizar y gestionar el mecanismo de daño dominante y más crítico: la incrustación por carbonatos, la cual representa la mayor amenaza a la continuidad operacional (Probabilidad de Falla Funcional).

Paralelamente, se mantendrá el enfoque de Mantenimiento Preventivo/Predictivo derivado del análisis RCM para los modos de falla de válvulas y flujómetros. De esta manera, el Plan Matriz resultante integrará tareas de mitigación de riesgo con tareas de preservación de activos, asegurando una cobertura completa de todos los modos de falla identificados en el FMEA.

9.2.1. Análisis FMEA para activos identificados

Tabla 20: Análisis FMEA para ductos de agua de proceso.

Activo	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto (Consecuencia)
Ducto Agua Proceso	Transportar caudal de agua (Q) a presión (P) hacia molino SAG.	Restricción de flujo: El caudal entregado es menor al requerido.	Depósito de carbonatos, reducción del área transversal por precipitación de $CaCO_3$.	Disminución de tratamiento en molienda SAG.
	Contener el fluido sin fugas al exterior.	Pérdida de Contención: Goteo o filtración.	Degradación de juntas, falla en unión bridada por corrosión interna/externa debido a humedad.	Derrame local (Impacto Ambiental leve/Seguridad). Costo de reparación.

Tabla 21: Análisis FMEA para flujómetros electromagnéticos.

Activo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla (Causa Raíz)	Efecto (Consecuencia)
Flujómetro Magnético	Medir caudal (Q) con precisión.	Desviación de Lectura: Error $>0.5\%$.	Aislamiento de Electrodos: Capa no conductiva ($CaCO_3$) bloquea el voltaje inducido.	Balance de masa erróneo.
			Falla EPD: Detección incorrecta de tubería vacía (ruido por aire).	
			Daño en Liner por abrasión o químicos agresivos.	

Tabla 22: Análisis FMEA para válvulas de guillotina.

Activo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla (Causa Raíz)	Efecto (Consecuencia)
Válvula Guillotina	Aislar flujo (Cierre hermético).	Fuga Interna: Paso de fluido con válvula cerrada.	Desgaste abrasivo del asiento elastomérico o manguitos.	Imposibilidad de bloqueo seguro aguas abajo.
			Acumulación de sólidos compactados en la guía inferior.	
	Operar a demanda (Abrir/Cerrar).	Falla de Actuación: No opera o movimiento errático.	Atascamiento por In-crustación: Adherencia de la hoja a las guías por incrustación.	Pérdida de control del proceso. Riesgo de golpe de ariete.
			Falla Neumática: Fuga en sellos del pistón o solenoide trabada por polvo.	
			Desalineación Vástago-Compuerta.	
	Contener fluido al exterior.	Fuga Externa: Derrame por el cuello.	Relajación de pernos del prensaestopas.	Derrame ambiental y riesgo de seguridad.
			Desgaste del sello secundario por fricción excesiva (falta de lubricación).	

Tabla 23: Análisis FMEA para válvulas de control mariposa.

Activo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla (Causa Raíz)	Efecto (Consecuencia)
Válvula Mariposa	Regular caudal según señal 4-20mA.	Pérdida de Control: Respuesta no lineal o inestable.	Histéresis Mecánica: Juego en la conexión eje-disco o desgaste en actuador.	Oscilación del lazo de control. Calidad de producto variable.
			Descalibración del Posicionador.	
	Operar sin daño físico.	Daño Estructural: Ruido y vibración.	Cavitación: Daño en disco/asiento por alta caída de presión (ΔP).	Falla catastrófica del equipo. Perforación de tubería.
			Falla de Topes de Carrera: Disco sobrepasa los 90°.	
	Contener fluido.	Fuga Externa.	Fuga por sellos del eje debido a alto ciclaje de control.	Derrame local.

Tabla 24: Análisis FMEA para válvulas manuales (globo y compuerta).

Activo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla (Causa Raíz)	Efecto (Consecuencia)
Globo	Regular flujo fino.	Fuga Interna (Paso).	Erosión: Canales en asiento por alta velocidad de fluido.	Pérdida de capacidad de regulación.
Compuerta	Aislar flujo.	Traba Mecánica: No cierra/abre.	Sedimentación: Acumulación de sólidos en la caja de la cuña.	Imposibilidad de aislamiento para mantención.
			Corrosión en rosca del vástago por falta de grasa/uso.	
		Fuga Interna.	Rayaduras en caras de la cuña por cierre con flujo sucio.	Llenado indeseado de líneas.

9.2.2. Evaluación de criticidad y jerarquización del riesgo

Para la jerarquización del riesgo cabe destacar que para los activos evaluados estos están expuestos al mismo contexto operacional durante su funcionamiento lo que provoca que en gran parte de los modos de falla de estos sean similares o iguales, por lo que las tablas de ductos en cada tramo, se considera que el modo de falla, es la reducción del área transversal del ducto, debido a incrustación. Además, las tablas que contienen el detalle de los cálculos de CoF para ductos se encuentran en el anexo A.7.

Para los flujómetros, sucede de manera similar, el modo de falla recurrente en estos es la aislación de electrodos. Por otro lado las válvulas suelen fallar de distintas maneras, pero su modo de falla se centra principalmente en la función de regular el flujo o abrir y cerrar el paso del agua lo que también será considerado como su modo de falla común o recurrente.

Para efectos de esta memoria, los términos nivel de riesgo (derivado de API 581) y Criticidad (derivado de SOMA) se considerarán equivalentes para la jerarquización final, entendiendo ambos como el producto de la probabilidad por la consecuencia

TRAMO 4

Tabla 25: Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro	t	Art	Dfincrust	PoF	FF	CoF	Riesgo
Anillo A	DT01	Acero Carbono	24"	10	1.752	800	0.02448	4	6	24
	DT02	Acero Carbono	10"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
	DT03	Acero Carbono	10" ->8"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
	DT04	Acero Carbono	16" ->14"	10	1.752	800	0.02448	4	5	20
	DT05	Acero Carbono	14"	10	1.752	800	0.02448	4	4	16
Anillo B	DT06	Acero Carbono	24"	5	0.876	50	0.00153	3	6	18
	DT07	Acero Carbono	10"	5	0.876	50	0.00153	3	3	9
	DT08	Acero Carbono	8"	5	0.876	50	0.00153	3	3	9
	DT09	Acero Carbono	10" ->8"	5	0.876	10	0.000306	2	3	6
	DT10	Acero Carbono	16"	2	0.3504	2	0.0000612	1	6	6
	DT11	Acero Carbono	14" ->8"	2	0.3504	2	0.0000612	1	4	4

Tabla 26: Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.

Línea	Ducto	Válvula	Tipo	Diametro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad
Anillo A	DT02	VV01	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV02	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV03	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV04	Control mariposa	10"	0	0	0	5	5	2	5	10
		VV05	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
	DT03	VV06	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV07	Guillotina neumática	8"	0	0	0	2	2	1	4	4
	DT04	VV08	Guillotina neumática	14"	0	0	0	8	8	2	4	8
	DT05	VV09	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT04	VV10	Guillotina neumática	14"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV11	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
		VV12	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
		VV13	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
Anillo B	DT07	VV14	Globo	10"	12	0	0	8	20	4	2	8
		VV15	Guillotina neumática	10"	12	0	0	8	20	4	4	16
		VV16	Guillotina neumática	10"	12	0	0	8	20	4	4	16
		VV17	Control mariposa	10"	12	0	0	5	17	3	5	15
	DT09	VV18	Guillotina neumática	10"	12	0	0	8	20	4	4	16
	DT08	VV19	Guillotina neumática	8"	12	0	0	2	14	3	4	12
	DT10	VV20	Guillotina neumática	16"	30	0	12	10	52	6	4	24
		VV21	Guillotina neumática	16"	30	0	12	10	52	6	4	24
		VV22	Control mariposa	16"	30	0	12	5	47	6	5	30
		VV23	Compuerta	16"	38	0	12	5	55	6	2	12
		VV24	Guillotina neumática	16"	30	0	12	10	52	6	4	24
	DT11	VV25	Guillotina neumática	14"	12	0	0	8	20	4	4	16

Tabla 27: Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.

Línea	Ducto	Flujómetro	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad
Anillo A	DT03	FJ02	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT04	FJ04	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT05	FJ05	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
Anillo B	DT07	FJ01	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT09	FJ03	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT10	FJ06	16"	0	0	0	5	5	2	3	6

9.3. Tramo 4: Síntesis de riesgo y criticidad de activos

El análisis de jerarquización para el Tramo 4 evidencia resultados diferenciados según la naturaleza del activo (estático/dinámico) y su contexto operativo. Esta distinción permite desacoplar necesidades de *integridad física* (ductos) de *disponibilidad funcional* (válvulas e instrumentación).

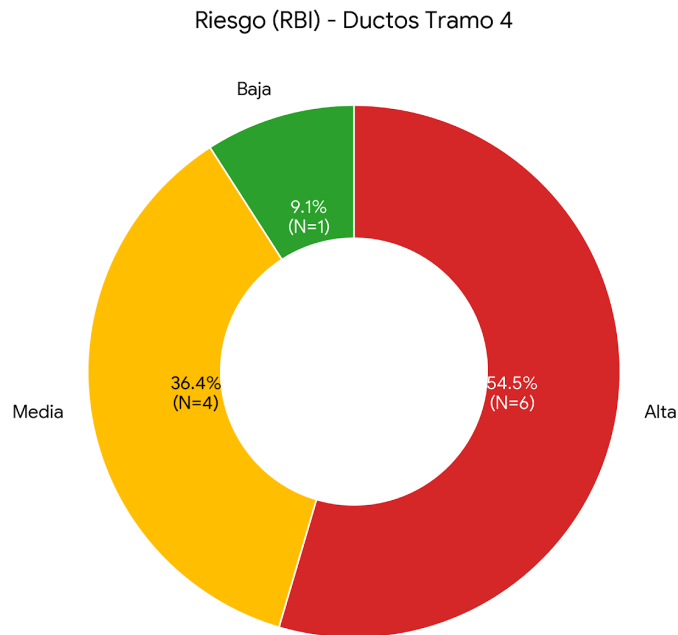


Figura 27: Distribución de nivel de riesgo a la integridad (RBI-RBM) en ductos del Tramo 4.

Como se observa en la Figura 27, predomina el nivel de riesgo *Alto* (60 %). Ello responde a la condición de los ductos del Anillo A, donde la incrustación por carbonatos aumenta la probabilidad de falla funcional por obstrucción, tanto en operación como en *stand-by*. La estrategia derivada apunta a la recuperación de la integridad mediante limpieza o reemplazo.

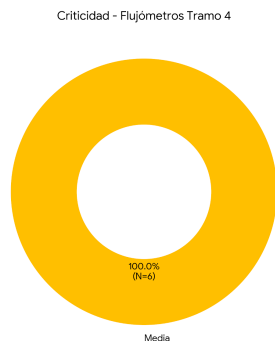


Figura 28: Perfil de criticidad funcional para instrumentación (flujómetros) en Tramo 4.

La instrumentación muestra un perfil homogéneo de criticidad *Media*. Si bien los flujómetros son necesarios para el balance de aguas, no constituyen cuellos de botella que detengan la producción inmediata, por lo que se recomienda una estrategia estandarizada basada en verificación de calibración y diagnóstico funcional.

Distribución de Criticidad y Tipo de Válvula - Tramo 4

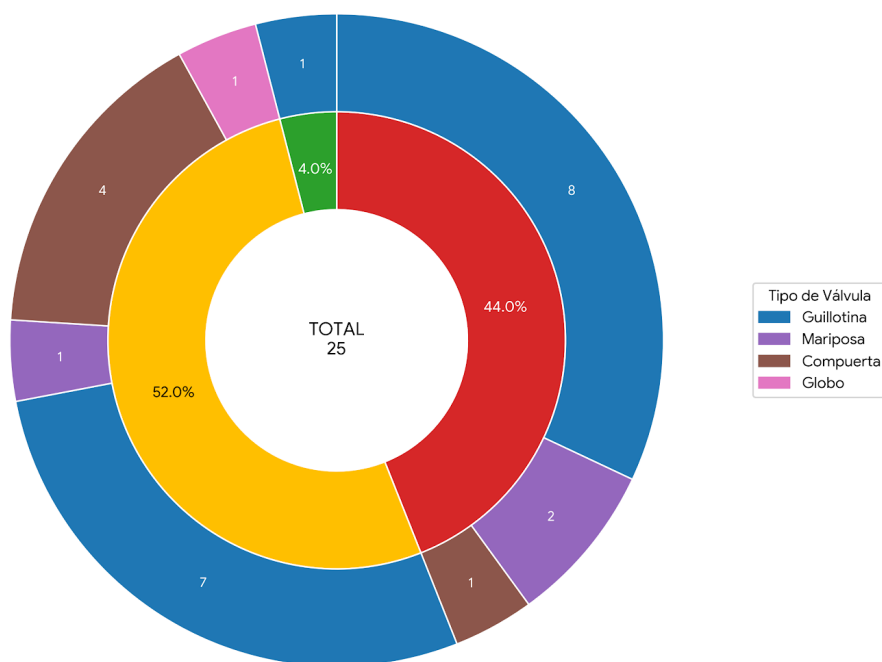


Figura 29: Distribución de criticidad funcional y tipología de válvulas en Tramo 4.

En válvulas se observa una polarización de criticidad:

- La criticidad *Alta* (44 %) corresponde a válvulas operativas del Anillo B, donde las funciones de corte y control son vitales para la alimentación de los molinos. Predominan válvulas tipo guillotina y mariposa, que deben priorizarse en el stock de repuestos críticos.
- La criticidad *Media* (52 %) agrupa mayoritariamente válvulas del Anillo A. Aunque sus ductos asociados presentan alto riesgo físico, su función es secundaria al estar la línea fuera de servicio; aquí corresponde un plan de preservación con pruebas de ciclado esporádicas para evitar atascamiento.

Los resultados del Tramo 4 validan la metodología híbrida **RBI + RCM**. Se justifica una asignación asimétrica de recursos: inversiones de **recuperación de integridad** para ductos degradados y **aseguramiento de confiabilidad** para válvulas en operación. Este patrón es aplicable a los demás tramos del sistema; aunque la distribución porcentual de criticidad puede variar según configuración y condición, la lógica de decisión se mantiene constante.

10. Fase III: Diseño de estrategias de mantenimiento y planes matrices

La Fase III tiene por objetivo establecer la estrategia óptima de mantenimiento y la formalización de planes matrices para los activos identificados en la Fase II, en función de su nivel de riesgo y criticidad previamente definido. Esta sección busca materializar una propuesta de valor para la Superintendencia de Infraestructura, mediante el diseño de planes matrices de carácter proactivo, acorde con la jerarquización de los activos.

En las secciones siguientes se definen estrategias de mantenimiento de carácter general, de modo que puedan ser replicadas posteriormente a cada activo específico. En este sentido, para ductos, válvulas y flujómetros se establecen estrategias diferenciadas según si el activo presenta un nivel de riesgo o criticidad bajo, medio o alto.

10.1. Criterios de diferenciación de estrategias según la naturaleza del riesgo

Si bien la matriz de jerarquización (zonas Roja, Amarilla y Verde) unifica la visualización del riesgo para todos los activos, la interpretación de dicho riesgo y la selección de la estrategia de mantenimiento dependen de la física de falla asociada a cada tipo de activo. En esta memoria se adopta un enfoque híbrido que distingue entre dos naturalezas fundamentales de riesgo:

1. **Riesgo por degradación acumulativa:** En el caso de las tuberías, el nivel de riesgo calculado representa un diagnóstico del **estado de salud actual** del activo.
 - Un ducto clasificado en **Zona Roja** indica que la acumulación de incrustación ha superado el umbral crítico ($d_{crit} \geq 50$ mm), lo que constituye una falla funcional activa por restricción de caudal.
 - **Consecuencia estratégica:** La estrategia no puede ser preventiva, ya que la inspección no revierte la incrustación existente. En consecuencia, se debe aplicar una estrategia **correctiva programada o restaurativa**, orientada a la limpieza mecánica y/o química para recuperar la capacidad de diseño del activo.
2. **Riesgo por criticidad funcional:** Para componentes electromecánicos, el nivel de riesgo refleja la **importancia estratégica** del activo dentro del proceso productivo y la severidad de las consecuencias ante una falla potencial.
 - Una válvula en **Zona Roja** no necesariamente presenta un daño físico actual; sin embargo, su operatividad es crítica para la continuidad del negocio o para condiciones de seguridad.
 - **Consecuencia estratégica:** La estrategia debe ser eminentemente **preventiva o predictiva**, con el objetivo de asegurar la disponibilidad del activo y evitar la ocurrencia de la falla.

En síntesis, la metodología aplica un criterio de restauración para activos estáticos degradados y un criterio de preservación funcional para activos mecánicos críticos, optimizando la asignación

de recursos y evitando tanto el sobre-mantenimiento en activos sanos como la inacción sobre activos ya obstruidos.

10.2. Definición de estrategias de mantenimiento

A continuación se definen los conceptos fundamentales utilizados para estructurar las estrategias de mantenimiento. En función del nivel de riesgo o criticidad obtenido, se asigna el tipo de mantenimiento y las actividades a realizar, justificando técnicamente dicha selección.

- **Riesgo/Criticidad:** Indicador definido como el producto de la probabilidad de falla (PoF) y la consecuencia de falla (CoF). El puntaje resultante permite clasificar el activo en categorías de riesgo alto, medio o bajo.
- **Modo de falla recurrente (MFR):** Falla que afecta predominantemente al equipo durante su vida útil y que impide el cumplimiento de sus funciones. Su identificación se realiza mediante análisis técnico y criterio experto del personal de la superintendencia.
- **Estrategia de mantenimiento (EM):** Definida según el estándar SOMA y clasificada como predictiva, preventiva o correctiva, en función de la criticidad del activo.
- **Tipo de mantenimiento (TM):** Asociado directamente a la estrategia seleccionada:
 - Para mantenimiento predictivo: Mantenimiento Basado en Condición (MBC) y analítica avanzada.
 - Para mantenimiento preventivo: Mantenimiento Basado en Uso (MBU), Mantenimiento Basado en Tiempo (MBT) e inspecciones rutinarias.
 - Para mantenimiento reactivo: Operación a la falla.
- **Actividad de mantenimiento:** Acción concreta que permite ejecutar la estrategia definida.

10.3. Estrategia de mantenimiento para ductos

La estrategia aplicada a las tuberías de agua de proceso se centra en el control de la reducción del diámetro efectivo. Dada la naturaleza progresiva de la incrustación, la estrategia se discrimina según la zona de riesgo identificada en la Fase II.

Modo de falla recurrente (MFR):

Obstrucción parcial o total por acumulación de carbonato de calcio ($CaCO_3$), que genera una disminución del caudal disponible y un aumento de las pérdidas de carga.

Definición de estrategias por nivel de riesgo:

- **Riesgo alto → Estrategia correctiva**
 - *Estrategia (EM):* Correctivo programado / mantenimiento mayor.

- *Tipo (TM)*: Limpieza mecánica complementada con tratamiento químico.
 - *Actividad*: Limpieza mecánica mediante hidrojeteo, apoyada con la aplicación de inhibidores de incrustación para reducir la tasa de acumulación. Verificación posterior mediante ensayos no destructivos (NDT).
- **Riesgo medio → Estrategia predictiva**
- *Estrategia (EM)*: Mantenimiento basado en condición.
 - *Tipo (TM)*: Monitoreo de condición.
 - *Actividad*: Seguimiento mensual de presión diferencial (ΔP) entre tramos y medición semestral de espesores por ultrasonido en puntos estratégicos, para proyectar la tasa de crecimiento de incrustación.
- **Riesgo bajo → Estrategia preventiva básica**
- *Estrategia (EM)*: Mantenimiento preventivo.
 - *Tipo (TM)*: Inspección sensitiva.
 - *Actividad*: Inspección visual anual de fugas en uniones bridadas y verificación del estado de soportes por sobrecarga.

10.4. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo guillotina

Válvulas críticas para el aislamiento de tramos (modelos referenciales Clarkson KGD y Bray Series 746/762), vulnerables al atascamiento de la hoja por incrustación del fluido y desgaste de elastómeros [45, 46, 47].

Modo de falla recurrente (MFR)

- Atascamiento de la hoja por acumulación de sólidos o desalineación del vástago.
- Fuga externa por desgaste de sello.

Definición de estrategias por nivel de riesgo:

- **Riesgo Alto → Estrategia preventiva avanzada**
- *Tipo (TM)*: Mantenimiento basado en tiempo (MBT).
 - *Actividad*:
 1. **Prueba de Carrera Parcial**: Ciclado mensual (10-20 %) para romper costras de incrustación en la hoja sin interrumpir el proceso.
 2. **Lubricación Forzada**: Inyección trimestral de grasa de litio/molibdeno en graseas del vástago y caja de rodamientos para asegurar torque de operación.
 3. **Inspección de Actuador**: Verificación trimestral de fugas de aire en cilindros neumáticos y limpieza de válvulas solenoides para evitar atascamiento por polvo.

- **Riesgo medio → Estrategia preventiva**

- *Tipo (TM):* Mantenimiento basado en tiempo (MBT).
- *Actividad:*
 1. **Ciclado Completo:** Operación de apertura y cierre total (100 %) en cada parada de planta para verificar recorrido y limpiar asiento.
 2. **Ajuste de Prensaestopa:** Inspección visual cada mantenimiento mayor de fugas por el sello superior; re-apriete controlado de tuercas del prensaestopas si se detecta goteo.

- **Riesgo bajo → Estrategia correctiva**

- *Tipo (TM):* A la falla
- *Actividad:* Inspección visual anual de integridad externa (fugas en uniones bridadas). Intervención de reemplazo de manguitos/sellos solo ante fuga evidente o inoperatividad.

10.5. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo globo

Utilizadas para regulación fina, sufren alta erosión en el conjunto obturador/asiento debido a la turbulencia del fluido.

Modo de falla recurrente (MFR)

Pérdida de hermeticidad interna (paso de fluido) por erosión del asiento o en el obturador.

Definición de estrategias por nivel de riesgo:

- **Riesgo Alto → Estrategia predictiva**

- *Tipo (TM):* Mantenimiento basado en condición (MBC).
- *Actividad:*
 1. **Ultrasonido:** Inspección semestral para detectar el perfil acústico de turbulencia interna (fuga) con la válvula cerrada.
 2. **Prueba de Hermeticidad (Banco):** En mantenimiento mayor, desmontaje y prueba de asiento bajo estándar API 598.

- **Riesgo medio → Estrategia preventiva**

- *Tipo (TM):* Mantenimiento basado en tiempo (MBT).
- *Actividad:*
 1. **Ajuste de Prensaestopa:** Verificación semestral de fugas por el vástago y re-apriete de tuercas de prensaestopa para compensar el desgaste del grafito/PTFE.
 2. **Lubricación de Vástago:** Limpieza y engrase de la rosca expuesta (si es vástago ascendente) para garantizar suavidad en la regulación.

- **Riesgo bajo → Estrategia correctiva**

- *Tipo (TM)*: A la falla.
- *Actividad*: Inspección visual anual de fugas externas. Reemplazo de sellos solo ante goteo evidente.

10.6. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo mariposa

Activos dinámicos de alto ciclaje (basado en modelos Bray Series 40/41) que controlan el flujo al molino. Su falla afecta la estabilidad del lazo de control [48].

Modo de falla recurrente (MFR)

Desviación de control (Histéresis), desgaste de sello por ciclaje continuo y daño en actuador.

Definición de estrategias por nivel de riesgo:

■ Riesgo Alto → Estrategia predictiva

- *Tipo (TM)*: Mantenimiento Predictivo / Analítica de Datos.
- *Actividad*:
 1. **Análisis de Histéresis**: Monitoreo continuo de la discrepancia o juego de la válvula. Una desviación $> 5\%$ indica desgaste en la conexión vástago-disco o problemas en el posicionador.
 2. **Inspección de Montaje**: Verificación de torque en pernos de montaje del actuador, propensos a soltarse por la vibración durante su funcionamiento.

■ Riesgo medio → Estrategia preventiva

- *Tipo (TM)*: Inspección Rutinaria.
- *Actividad*:
 1. **Ajuste de Sellos**: Inspección visual de fugas en el cuello de la válvula. Ajuste de los pernos del retenedor del vástago (según manual Bray) para comprimir el sello.
 2. **Verificación de Movimiento**: Comprobación visual anual de movimiento suave (sin saltos) durante la operación.

■ Riesgo bajo → Estrategia correctiva

- *Tipo (TM)*: A la falla.
- *Actividad*: Inspección visual anual. Reemplazo de asiento elastomérico solo ante falla de sello.

10.7. Estrategia de mantenimiento para válvulas tipo compuerta

Válvulas de aislamiento manual, propensas al atascamiento por largos periodos de inactividad.

Modo de Falla Recurrente (MFR)

Traba mecánica por corrosión/material particulado en la rosca del vástago o acumulación de sólidos en el alojamiento de la cuña (fondo del cuerpo).

Definición de estrategias por nivel de riesgo:

- **Riesgo alto y/o medio → Estrategia preventiva**

- *Tipo (TM)*: Mantenimiento basado en tiempo (MBT).
- *Actividad*:
 1. **Ciclado Anual Obligatorio**: Ejecución de ciclo completo (Cerrar/Abrir) para limpiar el alojamiento de la cuña y verificar que la válvula no esté agripada.
 2. **Limpieza de Rosca**: Limpieza con cepillo de acero y engrase de la rosca del vástago antes de operar la válvula, para evitar arrastrar suciedad hacia la tuerca de maniobra.
 3. **Inspección de Bonete**: Verificación de fugas en la junta cuerpo-bonete.

- **Riesgo bajo → Estrategia correctiva**

- *Tipo (TM)*: A la falla.
- *Actividad*: Intervención solo ante imposibilidad de maniobra de apertura y cierre o fuga externa evidente.

10.8. Estrategia de mantenimiento para flujómetros electromagnéticos

Basado en la tecnología de medición electromagnética (Endress+Hauser Promag W 400), estos instrumentos son susceptibles a la atenuación de señal por recubrimiento no conductivo en los electrodos.

Modo de falla recurrente (MFR)

- **Aislamiento de Electrodos**: Pérdida de señal de voltaje inducido debido a capa de incrustación ($CaCO_3$) sobre los electrodos de medición y referencia.

Definición de estrategias por nivel de riesgo:

- **Riesgo Alto → Estrategia predictiva**

- *Tipo (TM)*: Mantenimiento basado en condición (MBC).

- *Actividad:*
 1. **Verificación Heartbeat:** Ejecución semestral de diagnóstico interno (sin desmontaje) para validar integridad de bobinas y circuito de electrodos. Generación de informe de cumplimiento según ISO 9001.
 2. **Limpieza de Electrodos:** Solo si la verificación Heartbeat indica "Fallo por Ruido/Recubrimiento". Limpieza mecánica suave o química compatible con el liner (Poliuretano/Caucho) durante mantenimiento mayor.
- **Riesgo Medio → Estrategia funcional**
 - *Estrategia (EM):* Mantenimiento Preventivo.
 - *Actividad:*
 1. **Ajuste EPD (Empty Pipe Detection):** Verificación anual de los valores de conductividad para asegurar que el equipo corte a cero cuando la tubería se vacía o tiene aire atrapado.
 2. **Revisión de Lazos:** Comprobación de la salida de corriente (4-20 mA) o señal digital (Profibus/Modbus) para descartar errores en la transmisión de datos al DCS.
- **Riesgo Bajo → Estrategia correctiva**
 - *Estrategia (EM):* A la falla.
 - *Actividad:* Inspección visual de la integridad de la carcasa del transmisor (Grado IP68) y prensaestopas de cables. Verificación de ausencia de alarmas en display local.

A continuación se definen las estrategias de mantenimiento para el tramo 4.

TRAMO 4

Tabla 28: Tramo 4: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.

Línea	Ducto	Riesgo	MFR	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT01	24	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT02	12	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT03	12	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT04	20	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT05	16	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
Anillo B	DT06	18	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT07	9	Reducción progresiva de área.	Predictiva (MBC)	Monitoreo Condición	Monitoreo mensual de ΔP y medición de espesores (UT) semestral.
	DT08	9	Reducción progresiva de área.	Predictiva (MBC)	Monitoreo Condición	Monitoreo mensual de ΔP y medición de espesores (UT) semestral.
	DT09	6	Reducción progresiva de área.	Predictiva (MBC)	Monitoreo Condición	Monitoreo mensual de ΔP y medición de espesores (UT) semestral.
	DT10	6	Reducción progresiva de área.	Predictiva (MBC)	Monitoreo Condición	Monitoreo mensual de ΔP y medición de espesores (UT) semestral.
	DT11	4	Inicio de nucleación / Desgaste normal.	Preventiva (Rutina)	Inspección Sensitiva	Inspección visual anual de fugas en uniones y estado de soportes. No requiere intervención intrusiva.

Tabla 29: Tramo 4: Definición de estrategias de mantenimiento de flujómetros.

Línea	Ducto	Inst.	Riesgo	MFR	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT03	FJ02	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial de electrodos.	Predictiva (MBC)	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat Technology para validación de circuitos y electrodos sin interrupción. Ajuste de parámetros EPD (Empty Pipe Detection).
	DT04	FJ04	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva (MBC)	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat y validación de cero. Comprobación de lazo 4-20mA.
	DT05	FJ05	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva (MBC)	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat para diagnóstico de recubrimiento en electrodos.
Anillo B	DT07	FJ01	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva (MBC)	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat Technology y limpieza externa de transmisor.
	DT09	FJ03	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva (MBC)	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat y ajuste de EPD ante posibles burbujas de aire.
	DT10	FJ06	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva (MBC)	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat Technology para asegurar trazabilidad de la medición.

Tabla 30: Tramo 4: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 1 de 3).

Línea	Ducto	Válvula	Criticidad	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT02	VV01 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV02 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV03 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV04 (Mariposa)	10	Desgaste de sello / Fuga interna.	Preventiva	MBT	Ajuste de sellos (pernos retenedores) y verificación de movimiento suave.
		VV05 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
	DT03	VV06 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV07 (Guillotina)	4	Fuga externa por desgaste de sellos.	Correctiva	A la falla	Inspección visual anual de integridad externa. Reemplazo solo ante falla.
	DT04	VV08 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.

Tabla 31: Tramo 4: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 2 de 3).

Línea	Ducto	Válvula	Criticidad	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT05	VV09 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
	DT04	VV10 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100 %) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
	DT05	VV11 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
		VV12 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
		VV13 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
Anillo B	DT07	VV14 (Globo)	8	Desgaste de asiento (Paso).	Preventiva	MBT	Ajuste de prensaestopa y lubricación de rosca del vástago.
		VV15 (Guillotina)	16	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV16 (Guillotina)	16	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV17 (Mariposa)	15	Desviación de control (Histéresis).	Predictiva	Analítica	Monitoreo de histéresis (> 5 %) e inspección de torque en montaje.

Tabla 32: Tramo 4: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 3 de 3).

Línea	Ducto	Válvula	Criticidad	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo B	DT09	VV18 (Guillotina)	16	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
	DT08	VV19 (Guillotina)	12	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
	DT10	VV20 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV21 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV22 (Mariposa)	30	Desviación de control (Histéresis).	Predictiva	Analítica	Monitoreo de histéresis (> 5 %) e inspección de torque en montaje.
		VV23 (Compuerta)	12	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
		VV24 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
	DT11	VV25 (Guillotina)	16	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.

En el Anexo A.10 se presenta la totalidad de las estrategias de mantenimiento definidas para cada uno de los tramos abarcados en este estudio (Tramos 3, 5 y 6).

10.9. Tramo 4: Síntesis de asignación de estrategias de mantenimiento

La definición de estrategias para el Tramo 4 responde directamente a la asimetría de riesgos identificada en la fase anterior. La asignación de tareas no es uniforme, sino que se ajusta a la realidad operativa y al estado de integridad de cada subsistema.

A continuación, se presenta la distribución consolidada de las estrategias seleccionadas.

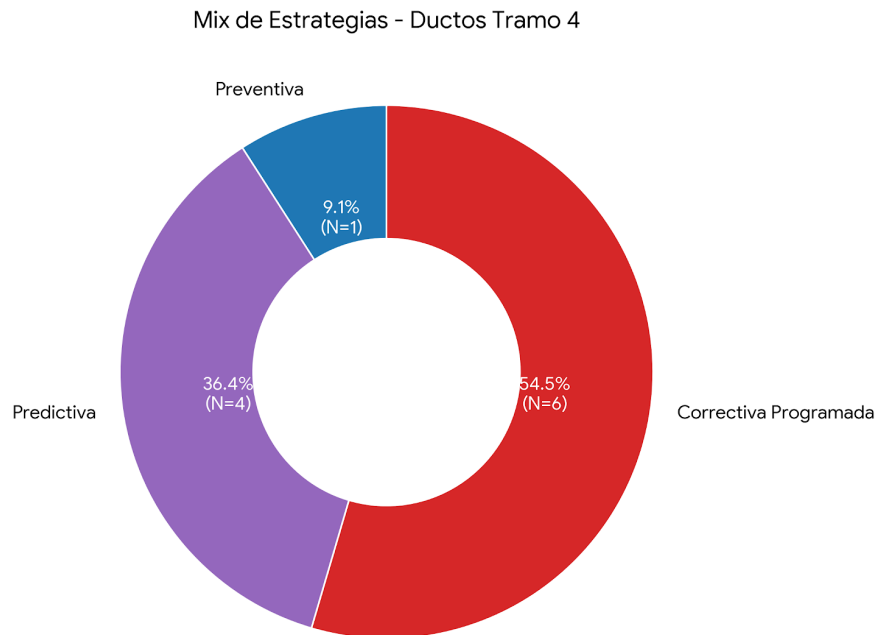


Figura 30: Distribución porcentual de estrategias de mantenimiento para ductos en el Tramo 4.

En el caso de los ductos (Figura 30), la estrategia dominante corresponde a **Correctivo Programado** (55 %), enfocada en la recuperación de diámetros críticos mediante hidrolimpieza de alta presión. Este resultado evidencia que, para los sectores degradados, el mantenimiento preventivo rutinario resulta insuficiente, siendo necesaria una intervención restaurativa mayor previa a la implementación de un régimen de monitoreo. Por otro lado, un 36 % de los activos (principalmente del Anillo B) se encuentra bajo una estrategia **Predictiva** basada en monitoreo de condición, optimizando el gasto al intervenir únicamente cuando las tendencias de espesor, caudal o presión así lo indiquen.

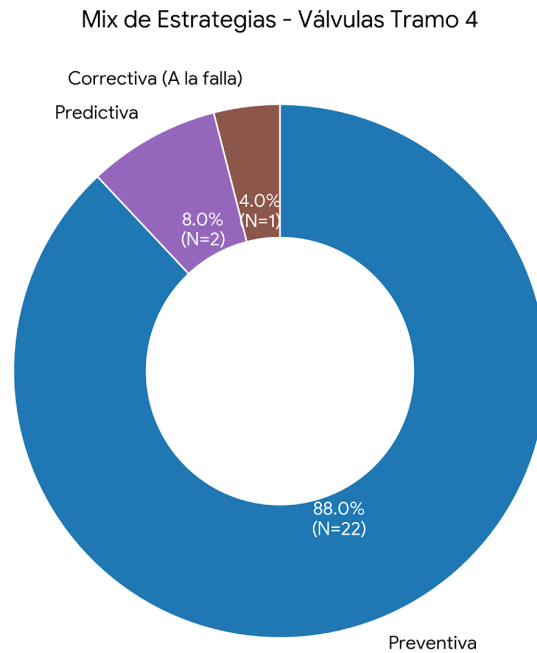


Figura 31: Distribución porcentual de estrategias de mantenimiento para válvulas en el Tramo 4.

Para las válvulas (Figura 31), la estrategia **Preventiva** (88 %) constituye la base del plan matriz. Esta elección se justifica dado que los modos de falla predominantes —atascamiento por incrustación y desgaste de sellos— son dependientes del tiempo de exposición y del número de ciclos, variables que pueden gestionarse de manera efectiva mediante estrategias basadas en tiempo (MBT).

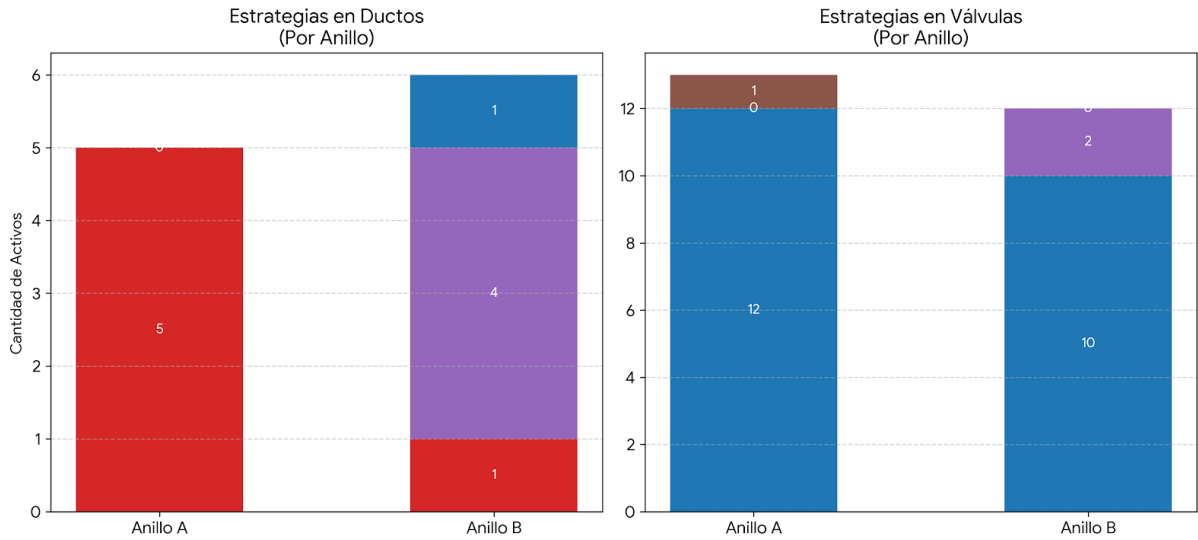


Figura 32: Comparativa de intensidad de mantenimiento por subsistema (Anillo A vs. Anillo B).

La Figura 32 sintetiza el enfoque del plan de mantenimiento para el Tramo 4:

- Diferenciación en ductos:** Se observa un cambio claro de paradigma entre el Anillo A (intervención correctiva) y el Anillo B (estrategia predictiva). Esta segregación evita el uso ineficiente de recursos de monitoreo avanzado en tuberías que ya presentan fallas funcionales, así como intervenciones invasivas innecesarias en ductos que mantienen condiciones operacionales aceptables.
- Sofisticación en válvulas:** Si bien la estrategia preventiva predomina en ambos anillos, es en el Anillo B donde se incorpora una estrategia **Predictiva** asociada al análisis de histéresis en válvulas de control. Esto demuestra que los recursos de diagnóstico avanzado se asignan exclusivamente a los activos de mayor criticidad funcional, alineándose con los principios de eficiencia del RCM.

10.10. Definición de planes matrices

A continuación, se establecen los elementos que deben considerarse para la definición de los planes matrices de mantenimiento, conforme a los lineamientos del estándar SOMA.

- **Puesto de Trabajo Responsable (PTR):** Unidad organizativa encargada de la planificación y gestión administrativa del activo. Para el presente estudio, corresponde al código **ACOCORPI** (Responsable Piping Concentradora DAND).
- **Puesto de Trabajo Ejecutor (PTE):** Unidad operativa, interna o externa, responsable de ejecutar físicamente la intervención en terreno. En este caso:
 - **ACOMXPI1:** Mantenimiento piping concentradora externo.
 - **ACOIXNI1:** Inspección piping concentradora externo.
- **Hoja de Ruta (Task List) (HR):** Documento que define la secuencia lógica de operaciones, normas aplicables, pautas de seguridad, permisos de trabajo y los recursos necesarios (materiales y mano de obra) para ejecutar la estrategia de mantenimiento de forma estandarizada.
 - **Descripción Breve (DB):** Denominación concisa de la tarea a realizar.
 - **Dotación y Especialidad (DOT):** Número de técnicos requeridos y su especialidad (mecánico, instrumentista, soldador).
 - **Trabajo y Duración (HH):** Estimación del esfuerzo requerido, expresado en horas-hombre.
 - **Paquete de mantenimiento (Frec):** Ciclo de intervención definido según la política seleccionada: mantenimiento basado en tiempo (MBT) o basado en uso (MBU).
 - **MAF:** Pauta detallada del paso a paso de la actividad.
 - **Materiales y Repuestos (MAT):** Listado de insumos requeridos para asegurar su disponibilidad logística previa a la ejecución.
- **Número de Plan de Mantenimiento (NPM):** Identificador único en SAP que vincula la estrategia con los objetos técnicos (equipos o ubicaciones técnicas).
 - **Nombre del plan de mantenimiento:** Denominación del plan.
 - **Posición:** Elemento del plan encargado de generar las órdenes de trabajo.
 - **Ubicación técnica:** Zona del activo mantenible, generalmente definida a nivel 5.
 - **Centro de planificación:** División Andina (AN01).
 - **Clase de orden:** Orden planificada (PL).
 - **Prioridad:** Prioridad grado 3.
 - **Grupo de planificación:** A32 Concentrador.
 - **Clase de actividad PM:**
 1. 01 Inspección
 2. 010 Preventivo sistemático
 3. 020 Preventivo predictivo
 4. 025 Planificado correctivo

10.11. Planes matrices generales para ductos

A continuación, se definen los estándares de mantenimiento aplicables a la familia de ductos y tuberías, diferenciados según la estrategia de riesgo definida previamente.

Plan matriz N°1: Limpieza correctiva programada (Hidrolimpieza)

Este plan corresponde a una intervención mayor para tramos con riesgo alto de obstrucción por incrustación, integrando verificación de integridad mecánica previa.

- **Código SOMA:** STD-AP-DUCT-024S-MEC
- **Estrategia:** Correctiva programada / Preventiva basada en condición.
- **Frecuencia base:** Cada vez que se supere el umbral crítico de incrustación que altere el caudal de alimentación o aumento de ΔP asociado.
- **Oportunidad de Ejecución:** MGA/PPL (Mantenimiento General/Parada de Planta.)
- **Dotación:** (5) 1 operador de hidrojet + 1 manipulador de pedalera + 1 operador de camión alta presión + 1 supervisor + 1 ayudante mecánico (7.5 HH Totales por tramo).
- **Recursos Materiales:** Camión más equipo de hidrolimpieza de alta presión (5-10 kPSI), equipo de ultrasonido (medición de espesores), empaquetadura de insertos, llave de torque, tuercas, golillas, pernos y Spool (carrete) de recambio para contingencia (Stock crítico).
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Preparación y Aislamiento (0.5 h):** Validación de permiso de trabajo y procedimiento de bloqueo. Drenaje gravitacional completo del tramo. Segregación del área de trabajo.
 2. **Apertura de Línea (0.5 h):** Desmontaje controlado de pernos de flanges ciegos en los insertos definidos. Retiro y guardado de pernería. Inspección visual inicial del porcentaje de luz disponible.
 3. **Evaluación de Integridad Previa (NDT) (0.5 h):** Medición de espesor de pared remanente mediante ultrasonido en codos (intradós/extradós) y generatriz inferior del tramo recto.
Criterio de Rechazo: Si $t_{remanente} < t_{mínimo_seguridad}$, ABORTAR hidrolimpieza y proceder a cambio de spool (Plan de contingencia).
 4. **Ejecución de Hidrolimpieza (4.0 h):** Solo si NDT es aprobado. Introducción de lanza con tobera rotativa. Aplicar presión progresiva (inicio 3000 PSI hasta máx. 10000 PSI). Realizar barrido en contraflujo para evacuar sedimentos. Monitorear efluente para detectar presencia de viruta metálica (señal de daño a la pared).
 5. **Cierre y Torque (1.0 h):** Limpieza de caras de asiento de los acoples. Instalación de sellos nuevos lubricados. Apriete de acoples y bridas con torque controlado según norma. Retiro de bloqueos.
 6. **Pruebas de Integridad (1.0 h):** Llenado de línea y presurización gradual. Inspección visual de goteos. Reapriete en caliente si es necesario.

Plan matriz N°2: Monitoreo de espesores (CBM)

Estrategia predictiva para el control de la tasa de desgaste y corrosión en puntos de control definidos

- **Código SOMA:** STD-AP-DUCT-052S-NDT
- **Estrategia:** Mantenimiento Basado en Condición (Predictivo).
- **Frecuencia Base:** 52 Semanas (Anual).
- **Oportunidad de Ejecución:** MRT (Rutina - Ejecutable en operación).
- **Dotación:** 2 Especialistas NDT (0.5 HH por punto).
- **Recursos Materiales:** Equipo de ultrasonido calibrado, Escobilla metálica, pica sal, espátula, bloque patrón, gel amplificador de señal, lija, plumón para metal (Casos específicos grateo de superficie con apoyo mecánico dependiendo del estado de la tubería).
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Calibración y Limpieza (0.1 h):** Verificación del equipo con bloque patrón escalonado. Preparación superficial en los 4 puntos cardinales del ducto (reloj 12, 3, 6, 9) removiendo óxido suelto o pintura descascarada con lija o escobilla sin dañar el metal base.
 2. **Medición por Ultrasonido (0.2 h):** Aplicación de gel. Toma de lectura de espesor remanente asegurando un acople estable. Descartar lecturas erróneas por rebote de señal.
 3. **Registro y Tendencia (0.1 h):** Consignar valores en planilla histórica. Calcular la Tasa de incrustación comparando el espesor inicial con el actual.
 4. **Análisis (0.1 h):** Comparar el espesor actual contra el espesor de retiro definido por diseño. Generar aviso de mantenimiento inmediato si el desgaste supera el 10 % anual o si el espesor actual es crítico.

Plan matriz N°3: Inspección visual de ruta

Inspección rutinaria para detección temprana de fugas.

- **Código SOMA:** STD-AP-DUCT-012S-OPR
- **Estrategia:** Preventiva Rutinaria.
- **Frecuencia Base:** 48 Semanas (Mantenimiento Mayor).
- **Oportunidad de Ejecución:** MRT (Rutina - Inspección de campo).
- **Dotación:** 2 Inspector Especialistas (2 HH por tramo de 100 [m]).

- **Recursos Materiales:** Linterna de alta potencia, paño, escobilla de acero, lista de chequeo.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Recorrido de Línea:** Caminata completa siguiendo el plano isométrico. Buscar manchas de humedad en el suelo o goteo activo en uniones y bridas.
 2. **Soportación:** Verificar integridad de abrazaderas tipo U y soportes deslizantes. Identificar soportes sueltos, deformados o sin tuercas.
 3. **Vibración y Ruido:** Detectar al tacto vibración excesiva o golpes de ariete audibles. Tocar la tubería para detectar zonas con temperatura anormal si aplica.
 4. **Reporte:** Marcar con cinta cualquier hallazgo y generar aviso de mantenimiento detallando la ubicación técnica exacta.

10.12. Planes matrices generales para válvulas de guillotina

Las válvulas de guillotina presentan como modo de falla predominante el atascamiento de la hoja por incrustaciones calcáreas, además de fugas por deterioro del prensaestopa. Se definen dos niveles de intervención.

Plan matriz N°4: Mantenimiento preventivo (Prueba de carrera)

Este plan es la barrera principal contra el atascamiento. Su objetivo es romper la inercia de las incrustaciones mediante el movimiento y asegurar la estanqueidad externa.

- **Código SOMA:** STD-AP-VGU-012S-MEC
- **Estrategia:** Preventiva Sistemática.
- **Frecuencia Base:** 12 Semanas (Trimestral).
- **Oportunidad de Ejecución:** PPL (Recomendado) o MRT (Con autorización de Operaciones).
- **Dotación:** (4) 3 Mecánico + 1 Instrumentista (4.0 HH Totales).
- **Recursos Materiales:** Grasa de Litio EP2, herramientas manuales, solvente dieléctrico.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Limpieza Externa (1.0 h):** Limpieza profunda de husillo roscado con escobilla de bronce y solvente para retirar grasa seca y polvo abrasivo. Limpieza de vástago de pistón neumático.
 2. **Lubricación (1.0 h):** Aplicación de capa fina de Grasa EP2 en husillo. Inyección de grasa en puntos de lubricación de yugo y rodamientos de accionamiento manual si corresponde.

3. **Prueba de Carrera (1.0 h):** Coordinar con Sala de Control. Realizar carrera parcial al 20 % y retorno. Si la válvula opera suave, realizar carrera al 100 % (cierre total) y apertura total para limpiar el asiento. Verificar confirmación de interruptores de límite.
4. **Ajuste de Prensa (1.0 h):** Inspeccionar prensaestopas durante el ciclo. Si hay fuga, ajustar tuercas de forma cruzada y progresiva un cuarto de vuelta hasta detener el goteo. No sobreapretar para no bloquear el actuador.

Plan matriz N°5: Cambio de mangas y sellos

Intervención mayor para recuperar la estanqueidad interna (paso de fluido) cuando el asiento resiliente ha fallado.

- **Código SOMA:** STD-AP-VGU-104S-MEC
- **Estrategia:** Correctiva Programada.
- **Frecuencia Estimada:** 104 a 208 Semanas (Bienal / Cuatrienal).
- **Oportunidad de Ejecución:** MGA (Mantenimiento general anual).
- **Dotación:** 3 Mecánicos (7.0 HH Totales).
- **Recursos Materiales:** Juego de repuestos (Mangas, sellos, raspador), lija fina, equipo de izaje.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Desmontaje (2.0 h):** Bloqueo y etiquetado aguas arriba y abajo. Desconexión de aire y señal. Izaje seguro y retiro de válvula hacia banco de trabajo.
 2. **Desarme y Diagnóstico (2.0 h):** Separación de cuerpos. Extracción de la hoja o guillotina. Inspección crítica de la hoja buscando curvaturas, picaduras severas o filo mellado. Si la hoja está dañada, debe reemplazarse o rectificarse.
 3. **Recambio (2.0 h):** Retiro de mangas o asientos viejos. Limpieza de alojamientos en el cuerpo fundido. Instalación de mangas nuevas lubricadas. Instalación de nuevo empaquetado de prensaestopas y rascador.
 4. **Prueba de Banco (1.0 h):** Montaje del cuerpo. Accionamiento en vacío para verificar alineación entre hoja y manga. Verificar torque de pernos pasantes del cuerpo. Reinstalación en planta con juntas nuevas.

10.13. Planes matrices generales para válvulas de globo

Las válvulas de globo, utilizadas para regulación de flujo, están expuestas a altos niveles de turbulencia y erosión en sus componentes internos (asiento y obturador).

Plan matriz N°6: Mantenimiento preventivo menor

Enfocado en preservar la operatividad mecánica del vástago (que suele tener rosca expuesta) y la estanqueidad externa de la prensaestopa.

- **Código SOMA:** STD-AP-VGL-024S-MEC
- **Estrategia:** Preventiva Sistemática.
- **Frecuencia Base:** 24 Semanas (Semestral).
- **Oportunidad de Ejecución:** MRT (Rutina - Zona Segura).
- **Dotación:** 2 Mecánicos (3.0 HH).
- **Recursos Materiales:** Grasa, cepillo de acero, llave francesa.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Inspección Vástago (0.5 h):** Verificar rectitud del vástago y estado de los hilos. Limpiar residuos sólidos.
 2. **Lubricación (1.0 h):** Engrase de rosca ascendente y rodamiento de la tuerca del volante. Verificar giro libre del volante.
 3. **Ajuste de Prensa (1.0 h):** Verificar holgura del prensapuros. Ajustar tuercas solo si hay evidencia de fuga activa. Asegurar que el prensaestopas no llegue a su tope mecánico.
 4. **Prueba Operativa (0.5 h):** Cerrar válvula dos vueltas y volver a abrir para asegurar que no está pegada en posición totalmente abierta o asentada atrás.

Plan matriz N°7: Reparación de asientos (Asentamiento)

Intervención correctiva programada para solucionar el paso o fuga interna causada por erosión.

- **Código SOMA:** STD-AP-VGL-CORR-MEC
- **Estrategia:** Correctiva Programada.
- **Frecuencia Estimada:** A la falla.
- **Oportunidad de Ejecución:** MGA .
- **Dotación:** 2 Mecánicos (5.0 HH).
- **Recursos Materiales:** Pasta de esmerilar (grano grueso y fino), azul de prusia, juego de empaquetaduras.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**

1. **Desarme (1.0 h):** Bloqueo y etiquetado. Despernar y retirar bonete. Extraer vástago y obturador. Inspeccionar visualmente el asiento en el cuerpo buscando canales de erosión por velocidad.
2. **Esmerilado y Asentamiento (2.0 h):** Aplicar pasta de esmerilar en el obturador. Realizar movimiento oscilatorio sobre el asiento usando herramienta de guía. Limpiar y verificar patrón de contacto con azul de prusia. El objetivo es un anillo continuo de contacto superior al 80 %.
3. **Renovación de Sellos (0.5 h):** Reemplazo obligatorio de la empaquetadura metálica del bonete y todo el empaquetado de grafito del vástago.
4. **Armado (1.5 h):** Montaje de bonete. Torqueo cruzado de pernos según especificación. Prueba hidrostática de cierre si es factible.

10.14. Planes matrices generales para válvulas de mariposa

Las válvulas de mariposa son activos críticos que requieren una estrategia mixta: mantenimiento mecánico del cuerpo y calibración precisa del lazo de control

Plan matriz N°8: Diagnóstico y calibración (Predictivo)

Este plan ataca los modos de falla de Histéresis, Descalibración y Caza del lazo de control.

- **Código SOMA:** STD-AP-VMA-024S-INS
- **Estrategia:** Predictiva (CBM).
- **Frecuencia Base:** 24 Semanas (Semestral).
- **Oportunidad de Ejecución:** PPL (Ideal) o MRT (Con baipás).
- **Dotación:** (3) 2 Mecánicos + 1 Instrumentista Especialista (3 HH).
- **Recursos Materiales:** Comunicador de campo, calibrador de procesos, solución jabonosa.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Revisión Neumática (1.0 h):** Drenar condensado del filtro regulador. Verificar que la presión de suministro sea constante. Aplicar solución jabonosa en conexiones para detectar fugas.
 2. **Verificación de Retroalimentación (0.5 h):** Solicitar a Sala comandos al 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. Comparar posición física mediante el índice visual contra el valor en el sistema de control. La desviación máxima permitida es de más menos 2 %.
 3. **Salud del Posicionador (0.5 h):** Conectar comunicador de campo. Descargar registros de error. Verificar alertas de desviación y señal de mando; si la señal de manejo es muy alta, indica atascamiento mecánico.
 4. **Calibración (1.0 h):** Ejecutar rutina de autocalibración de carrera si existe desviación. Ajustar cero y alcance.

Plan matriz N°9: Reemplazo de asiento resiliente (Sello)

Intervención mayor mecánica. Las mariposas suelen tener un sello elastomérico que envejece, se reseca o se corta por cavitación, perdiendo la estanqueidad.

- **Código SOMA:** STD-AP-VMA-156S-MEC
- **Estrategia:** Correctiva Programada.
- **Frecuencia Estimada:** 156 Semanas (Trienal).
- **Oportunidad de Ejecución:** MGA (Requiere retiro de equipo).
- **Dotación:** 3 Mecánicos + 1 Instrumentista (5.0 HH).
- **Recursos Materiales:** Sello o liner (EPDM/Viton), juntas tóricas de eje, lubricante compatible.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Retiro (1.5 h):** Desconexión eléctrica y neumática por instrumentista. Retiro de pernos. Extracción de la válvula.
 2. **Desarme (1.0 h):** Desmontar actuador y caja de engranajes. Retirar pasadores cónicos del disco. Extraer eje y sacar el disco del sello a presión. Colapsar y retirar el sello viejo.
 3. **Preparación e Instalación (1.5 h):** Limpiar exhaustivamente el alojamiento del cuerpo, ya que el óxido aquí deforma el sello nuevo. Lubricar exterior del sello nuevo con silicona. Insertar sello alineando orificios de eje. Montar disco y eje con cuidado de no morder la goma.
 4. **Ajuste Final (1.0 h):** Montar actuador. Ajustar pernos de tope de carrera mecánica para asegurar que el disco quede a 90 grados exactos en posición cerrada.

10.15. Planes matrices generales para válvulas de compuerta

Las válvulas de compuerta son equipos de aislamiento cuyo diseño de cierre por cuña las hace vulnerables a la acumulación de sedimentos en el alojamiento inferior del cuerpo, impidiendo el cierre total.

Plan matriz N°10: Ciclado y limpieza de hilos

El objetivo principal es evitar el agarrotamiento del vástago por falta de uso y remover mecánicamente (por turbulencia) los sedimentos acumulados en la base de la cuña mediante el ciclado

- **Código SOMA:** STD-AP-VCO-024S-MEC

- **Estrategia:** Preventiva Sistemática.
- **Frecuencia Base:** 24 Semanas (Semestral).
- **Oportunidad de Ejecución:** MRT (Coordinado con Operaciones).
- **Dotación:** 3 Mecánicos (2.0 HH).
- **Recursos Materiales:** Grasa, llave de maniobra.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Mantenimiento de Hilos (0.5 h):** Limpieza con escobilla de acero de la rosca del vástago. Lubricación abundante.
 2. **Ajuste de Prensa (0.5 h):** Reapriete de tuercas de prensaestopas para compensar relajación del grafito.
 3. **Ciclado de Lavado (0.5 h):** Cerrar la válvula hasta un 80 o 90 % para generar velocidad de flujo. Volver a abrir. Repetir 3 veces.
 4. **Verificación Auditiva (0.5):** Escuchar si hay sonido de molienda o arrastre de piedras al cerrar. Si la válvula no llega a tope o asiento, no forzar con palanca excesiva; repetir el ciclado.

Plan matriz N°11: Recuperación de asiento

Intervención correctiva cuando la válvula presenta pase(no corta el flujo) debido a erosión de la cuña o incrustación severa en el fondo que no sale con el ciclado.

- **Código SOMA:** STD-AP-VCO-CORR-MEC
- **Estrategia:** Correctiva Programada.
- **Frecuencia Estimada:** A la falla.
- **Oportunidad de Ejecución:** MGA .
- **Dotación:** 3 Mecánicos (5.0 HH).
- **Recursos Materiales:** Empaquetadura de bonete, anillos de grafito, lija.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Apertura (1.5 h):** Bloqueo y etiquetado. Retiro de pernos del bonete. Izaje del conjunto bonete, vástago y cuña verticalmente.
 2. **Limpieza de Fondo (1.0 h):** Iluminar el fondo del cuerpo. Retirar manualmente sedimentos compactados, piedras o restos de soldadura alojados en la guía de la cuña.
 3. **Inspección de Cuña (1.5 h):** Verificar caras de sello de la cuña. Si hay marcas leves, pulir con lija fina. Verificar holgura de la tuerca del vástago; si tiene mucho juego, reemplazar.
 4. **Cierre (0.5 h):** Instalación de empaquetadura nueva. Descenso de la cuña cuidando las guías laterales. Torqueo de bonete.

10.16. Planes matrices generales para flujómetros

Plan matriz N°12: Limpieza de electrodos (Físico)

Recuperación de medición por ensuciamiento.

- **Código SOMA:** STD-AP-INS-024S-MIX
- **Estrategia:** Preventiva Condicional.
- **Frecuencia Base:** 24 Semanas (Semestral).
- **Oportunidad de Ejecución:** PPL (Línea vacía obligatoria).
- **Dotación:** 1 Instrumentista + 1 Mecánico (3.0 HH).
- **Recursos Materiales:** Alcohol isopropílico, paños suaves, sellos nuevos, llave de torque.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**
 1. **Desmontaje (1.0 h):** Bloqueo y drenaje. Desconexión de cables de señal y tierra. Retiro de pernos de brida. Extracción cuidadosa del sensor o tubo de flujo.
 2. **Inspección (0.5 h):** Revisar integridad del revestimiento interno. Si hay cortes o ampollas, el equipo es inservible. Revisar anillos de tierra.
 3. **Limpieza (1.0 h):** Limpiar electrodos de medición con alcohol y paño. Nota crítica: No usar lija ni objetos metálicos. Limpiar anillos de tierra para asegurar conductividad.
 4. **Montaje y Torque (0.5 h):** Reinstalar con empaquetaduras nuevas. Centrar bien. Apretar pernos en secuencia de estrella con torque controlado, ya que el exceso de torque deforma el revestimiento y arruina el sensor. Reconectar tierra.

Plan matriz N°13: Verificación de salud (Electrónico)

Diagnóstico de salud del transmisor.

- **Código SOMA:** STD-AP-INS-012S-INS
- **Estrategia:** Predictiva.
- **Frecuencia Base:** 12 Semanas (Trimestral).
- **Oportunidad de Ejecución:** MRT (No invasivo).
- **Dotación:** 1 Instrumentista (1.0 HH).
- **Recursos Materiales:** Computador o comunicador, multímetro certificado.
- **MAF (Secuencia de Tareas):**

1. **Verificación de Lazos (0.3 h):** Medir voltaje en bornes (24 VCC). Verificar que la resistencia de lazo sea menor a 500 Ohms. Verificar apriete de cables de tierra.
2. **Diagnóstico Inteligente (0.4 h):** Ejecutar función de verificación de salud o latido desde el menú del transmisor. Verificar integridad de bobinas, circuito de electrodos y electrónica interna. Guardar reporte.
3. **Simulación (0.3 h):** Poner lazo en manual. Simular salida de corriente a 4 mA y 20 mA. Confirmar telefónicamente con operador de sala de control que los valores coinciden con flujo cero y flujo máximo.

A continuación, se asignan los planes matrices desarrollados a los activos identificados en el Tramo 4, de acuerdo con las estrategias de mantenimiento establecidas en función del riesgo calculado. Las tablas presentadas contienen información general de cada plan; para el detalle operativo completo, se debe consultar el código SOMA asociado.

TRAMO 4

Tabla 33: Tramo 4: Asignación de planes matrices de ductos.

Línea	Ducto	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
Anillo A	DT01	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
	DT02	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT03	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT04	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
	DT05	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
Anillo B	DT06	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
	DT07	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT08	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT09	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT10	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT11	Preventiva (Rutina)	STD-AP-DUCT-012S-OPR	Inspección visual de fugas y soportes.	2	2.0	48 Sem (MRT)

Tabla 34: Tramo 4: Asignación de planes matrices de flujómetros.

Ducto	Inst.	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT03	FJ02	Predictiva (MBC)	STD-AP-INS-012S-INS	Verificación Heart-beat y Lazos.	1	1.0	12 Sem (MRT)
DT04	FJ04	Predictiva (MBC)	STD-AP-INS-012S-INS	Verificación Heart-beat y Lazos.	1	1.0	12 Sem (MRT)
DT05	FJ05	Predictiva (MBC)	STD-AP-INS-012S-INS	Verificación Heart-beat y Lazos.	1	1.0	12 Sem (MRT)
DT07	FJ01	Predictiva (MBC)	STD-AP-INS-012S-INS	Verificación Heart-beat y Lazos.	1	1.0	12 Sem (MRT)
DT09	FJ03	Predictiva (MBC)	STD-AP-INS-012S-INS	Verificación Heart-beat y Lazos.	1	1.0	12 Sem (MRT)
DT10	FJ06	Predictiva (MBC)	STD-AP-INS-012S-INS	Verificación Heart-beat y Lazos.	1	1.0	12 Sem (MRT)

Tabla 35: Tramo 4: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 1 de 3).

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT02	VV01 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV02 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV03 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV04 (Mariposa)	Predictiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Diagnóstico y calibración.	3	3.0	24 Sem (PPL)
	VV05 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
DT03	VV06 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV07 (Guillotina)	Correctiva	STD-AP-VGU-104S-MEC	Cambio de mangas y sellos.	3	7.0	A la falla
DT04	VV08 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)

Tabla 36: Tramo 4: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 2 de 3).

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT05	VV09 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
DT04	VV10 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
DT05	VV11 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
	VV12 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
	VV13 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
DT07	VV14 (Globo)	Preventiva	STD-AP-VGL-024S-MEC	Mantenimiento preventivo menor.	2	3.0	24 Sem (MRT)
	VV15 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV16 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV17 (Mariposa)	Predictiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Diagnóstico y calibración.	3	3.0	24 Sem (PPL)

Tabla 37: Tramo 4: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 3 de 3).

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT09	VV18 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
DT08	VV19 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
DT10	VV20 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV21 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV22 (Mariposa)	Predictiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Diagnóstico y calibración.	3	3.0	24 Sem (PPL)
	VV23 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
	VV24 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
DT11	VV25 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)

10.17. Tramo 4: Síntesis de planes matrices y recursos estimados

La implementación de los planes matrices definidos previamente implica un despliegue de recursos que debe ser coherente con la criticidad del tramo evaluado. A partir de la asignación específica realizada para los 37 activos del Tramo 4 (ductos, válvulas e instrumentación), se obtiene la siguiente proyección de demanda de horas-hombre (HH) por ciclo base.

Distribución de Esfuerzo (HH) por Estrategia - Tramo 4

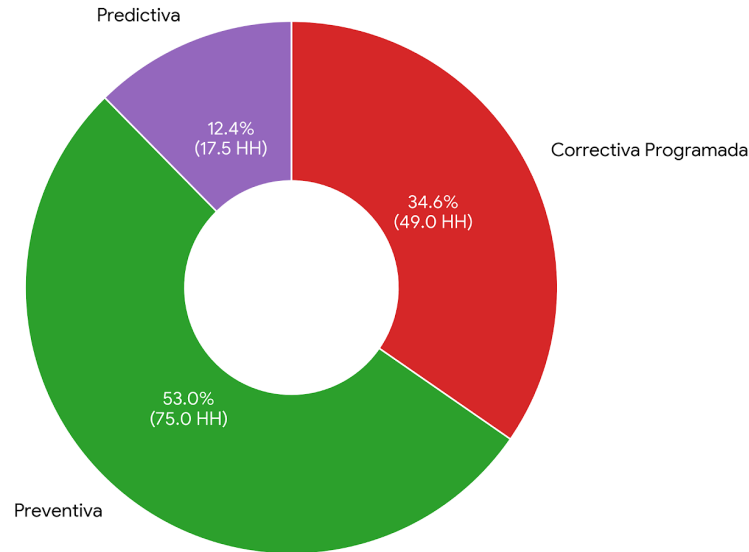


Figura 33: Distribución del esfuerzo de mantenimiento (HH) por tipo de estrategia en el Tramo 4.

Como se aprecia en la Figura 33, el perfil de esfuerzo refleja de manera directa la realidad operativa del sistema:

1. **Carga correctiva (34,6 %):** Representa la deuda técnica acumulada del activo. Las 49,0 HH estimadas corresponden casi en su totalidad a las actividades de hidrolimpieza de ductos del Anillo A. Este esfuerzo es obligatorio para restituir la funcionalidad base del sistema, evidenciando que, en ductos con incrustación severa, la estrategia de mantenimiento no admite intervenciones graduales ni diferidas.
2. **Carga preventiva (53,0 %):** Constituye el núcleo del plan de mantenimiento, con un total de 75,0 HH. Esta carga se concentra principalmente en las válvulas, lo que indica que la confiabilidad del sistema depende en gran medida de la ejecución disciplinada de tareas rutinarias, tales como lubricación y ciclado, más que de intervenciones mayores de reparación.
3. **Carga predictiva (12,4 %):** Si bien representa un menor volumen de horas (17,5 HH),

corresponde a la fracción de mayor valor agregado por hora invertida. Estas actividades se focalizan en los activos de mayor impacto funcional y de control del tramo, particularmente en la instrumentación y válvulas de control del Anillo B.

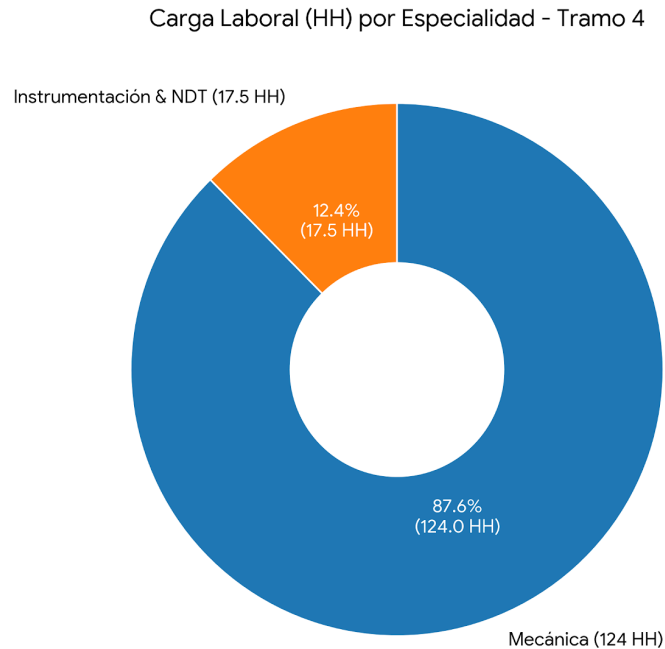


Figura 34: Demanda de recursos humanos por especialidad técnica en el Tramo 4.

La Figura 34 confirma la predominancia de la componente mecánica en la problemática de mantenimiento del Tramo 4. Un 87,6 % de la carga laboral total (124,0 HH) recae sobre la especialidad mecánica, lo que evidencia que el éxito del plan depende fundamentalmente de la disponibilidad de cuadrillas de cañerías y válvulas. En contraste, la especialidad de instrumentación y NDT, que concentra el 12,4 % de las HH, cumple un rol clave de diagnóstico y aseguramiento de calidad, requiriendo menor cantidad de horas, pero un mayor nivel de especialización técnica.

La estandarización bajo el marco SOMA ha permitido cuantificar de manera explícita el costo del **No Mantenimiento** —representado por las horas correctivas asociadas a la hidrolimpieza— frente al costo de la **confiabilidad**, expresado en las horas preventivas y predictivas. El plan propuesto equilibra esta relación, priorizando la recuperación de la capacidad de transporte en el corto plazo (Anillo A) y el aseguramiento de la disponibilidad operativa en el largo plazo (Anillo B).

11. Fase IV: Evaluación del impacto esperado

11.1. Evaluación económica de la propuesta de estrategia de mantenimiento

11.1.1. Definición y estructura de costos de mantenimiento

Se presentan los costos de intervención (C_{mant}) desglosados en sus componentes elementales, basándose en los precios unitarios de los contratos vigentes de Codelco División Andina. Esta estructuración permite visualizar los inductores de costo para cada nivel de complejidad.

Tabla 38: Análisis de precios unitarios para intervención de activos

Ítem de Costo / Recurso	Nivel A (Menor <6")	Nivel B (Medio 8" - 14")	Nivel C (Mayor >16")
1. RECURSOS HUMANOS (HH) - Tarifas Base ECO-01			
1.1 Técnico Mecánico / Soldador (21 USD/hh)	63 USD (3hh)	252 USD (12hh)	840 USD (40hh)
1.2 Supervisión / Capataz (34 USD/hh)	34 USD (1hh)	136 USD (4hh)	340 USD (10hh)
<i>Subtotal Mano de Obra</i>	<i>97 USD</i>	<i>388 USD</i>	<i>1.180 USD</i>
2. MATERIALES Y REPUESTOS			
2.1 Kit de Sellos y Elastómeros (Soft Parts)	30 USD	120 USD	650 USD
2.2 Elementos de Unión (Pernos/Tuercas)	10 USD	40 USD	350 USD
2.3 Consumibles (Lubricantes/Limpiadores)	5 USD	20 USD	200 USD
<i>Subtotal Materiales</i>	<i>45 USD</i>	<i>180 USD</i>	<i>1.200 USD</i>
3. SERVICIOS EXTERNOS			
3.1 Mecanizado y Recuperación de Partes	0 USD	100 USD	600 USD
3.2 Logística, Transporte y Certificación	6 USD	50 USD	200 USD
<i>Subtotal Servicios</i>	<i>6 USD</i>	<i>150 USD</i>	<i>800 USD</i>
COSTO TOTAL INTERVENCIÓN (C_{mant})	148 USD	718 USD	3.180 USD

Niveles de intervención definidos:

- **Nivel A (Mantenimiento Básico):** Intervención ligera *in situ* o taller menor. Enfocada en cambio de sellos blandos y lubricación, sin mecanizado.
- **Nivel B (Recuperación Media):** Reemplazo de pernería fatigada y mecanizado ligero de superficies.
- **Nivel C (Overhaul Completo):** Reparación mayor para activos críticos. Incluye logística de izaje (camión pluma), soldadura certificada para recuperación de cuerpo y mecanizado de precisión en maestranza externa.

11.1.2. Fundamento del Límite de Reparación Económica (ERL)

Para objetivar la decisión de renovación de activos, se utiliza el indicador *Economic Repair Limit* (ERL). Este ratio financiero compara el costo de restaurar la función del activo versus adquirir uno nuevo con garantía de fábrica.

$$ERL = \left(\frac{C_{HH} + C_{repuestos} + C_{servicios}}{V_{nuevo}} \right) \times 100[\%] \quad (12)$$

Criterio de Decisión (Umbral del 65 %) Para dar cumplimiento al requisito de Toma de Decisiones basada en Valor y Costo del Ciclo de Vida que exige la norma ISO 55000, se ha definido como criterio organizacional un ERL del 65 %. El racional técnico indica que, cuando una reparación supera este porcentaje, los riesgos asociados a la fatiga del material base (cuerpo de la válvula) y la ausencia de garantía de un equipo cero horas superan el ahorro marginal de la reparación.

- **$ERL \leq 65\%$ (Zona de Reparación):** La inversión extiende la vida útil de manera rentable.
- **$ERL > 65\%$ (Zona de Reemplazo):** El activo ha perdido su competitividad técnica-económica. Se recomienda el recambio por obsolescencia económica.

11.1.3. Matriz ERL con valores de mercado

A continuación, se aplica el criterio ERL a los activos tipo del sistema SAG.

Tabla 39: Matriz de Decisión ERL aplicada a activos SAG

Activo	Diámetro	Valor Nuevo (V_{nuevo} USD)	Costo Mant. (C_{mant} USD)	Ratio ERL (%)	Decisión Estratégica
Válvula Guillotina	8"	628	718	114,3 %	Reemplazo
	14"	7.580	718	9,5 %	Reparación
	24"	16.667	3.180	19,1 %	Reparación
Válvula Mariposa	10"	2.222	718	32,3 %	Reparación
	16"	4.000	3.180	79,5 %	Reemplazo
Válvula Globo	8"	4.444	718	16,2 %	Reparación
	10"	5.111	718	14,0 %	Reparación
Válvula Compuerta	8"	1.636	718	43,9 %	Reparación
	10"	2.402	718	29,9 %	Reparación
	16"	3.888	3.180	81,8 %	Reemplazo
Flujómetro Mag.	8"	1.666	718	43,1 %	Reparación
	16"	3.888	718	18,5 %	Reparación

11.2. Evaluación económica de los planes matrices

Para evaluar la rentabilidad del proyecto, se modela el flujo de caja incremental considerando la implementación integral de los planes de integridad (hidrojet) y confiabilidad (Válvulas/Instrumentación).

Parámetros de Evaluación:

- **Costo de Lucro Cesante (Detención):** 114,325 [USD/hr] (Costo oportunidad proceso SAG).
- **Tasa de Descuento:** 10 % anual.
- **Horizonte de Evaluación:** 5 años (Vida útil estimada antes de overhaul mayor).

11.2.1. Estructura de Inversión

Se considera la adquisición estratégica de stock crítico para habilitar la mantenibilidad del sistema desde el año 0.

Tabla 40: Presupuesto de Inversión Inicial

Ítem de Inversión	Cant.	Monto Total (USD)	Justificación Técnica
1. Activos Mayores (Stock Crítico)		49.331	
Stock Válvulas Guillotinas (ERL >65 %)	3	16.667	Repuesto para válvulas no reparables.
Stock Válvulas Manuales	3	11.664	Cobertura de tasa de falla anual.
Stock Flujómetro Mag.	6	21.000	Equipo crítico sin stand-by instalado.
2. Kits de Mantenimiento		8.400	
Set Sellos/Sleeves	3	3.400	Consumibles para planes preventivos.
Set Liners/Electrónica	2	5.000	Habilitación reparación interna.
3. Gestión del Cambio		5.000	
Ingeniería, Carga SAP y Capacitación	N/A	5.000	Implementación sistema SOMA.
TOTAL INVERSIÓN INICIAL (I_0)		62.731	Año 0 (2027)

11.2.2. Beneficios y Costos Operacionales

1. **Ahorro en Mantenimiento Correctivo:** Históricamente, la planta incurre en compras correctivas debido a fallas imprevistas, en el año 2025 se registro una gasto aproximado de 777.170 Considerando el parque total de válvulas identificadas en el sistema SAG y una tasa de falla estimada del 15 % anual sin mantenimiento, se proyecta un gasto evitable en reposición de activos de:

$$Ahorro_{Mat} \approx 46.600 \text{ [USD/año]}$$

Este valor corresponde a la compra evitada de válvulas nuevas gracias a la extensión de vida útil lograda con los planes preventivos.

2. **Costo Operacional del Plan (OPEX):** Corresponde a la sumatoria anual de las HH, materiales y servicios de los planes matrices descritos.
 - Planes de Integridad (hidrojet): **120.000 [USD/año]**.
 - Planes de Confiabilidad (Válvulas/Inst.): **16.500 [USD/año]**.
 - **Total OPEX: 136.500 [USD/año]**.

11.2.3. Flujo de caja detallado

En esta fase no se instalan activos capitalizables; por tanto, la Depreciación igual a 0. Los stocks críticos y kits de mantenimiento se tratan como Capital de Trabajo (variación de capital de trabajo neto, ΔNWC):

$$\Delta NWC_t = \Delta \text{Activos Circulantes Operativos}_t - \Delta \text{Pasivos Circulantes Operativos}_t$$

En nuestro caso, ΔNWC corresponde principalmente a inventario (stock de válvulas/insumos y kits), que genera una salida de caja en $t = 0$ (año 2027), no afecta EBIT (no es gasto contable), no se deprecia, y se recupera al finalizar el horizonte (año 2032) como entrada de caja.

El **Flujo de Caja Libre** (FCL) queda entonces:

$$FCL_t = \underbrace{(\text{EBITDA}_t - \text{Dep}_t)(1 - T) + \text{Dep}_t}_{\text{NOPAT} + \text{ajustes no caja}} - \Delta NWC_t - \text{CAPEX}_t$$

con $\text{Dep}_t = 0$ y $\text{CAPEX}_t = 0$ en esta fase.

Supuestos económicos.

- Moneda constante (sin inflación).
- Tasa de impuesto: $T = 27\%$.
- Tasa de descuento: $k = 10\%$.
- Horizonte: $n = 5$ años (2028–2032).
- Beneficio por riesgo (base): **1,0 hora/año** de detención evitada valorada a **114,3 kUSD/hr**.

Tabla 41: Flujo de caja económico proyectado (En miles de USD)

Ítem / Periodo	2027	2028	2029	2030	2031	2032
INGRESOS Y BENEFICIOS						
1. Ahorro Mant. Correctivo (repuestos)	–	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6
2. Beneficio por riesgo (1,0 hr/año)	–	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3
<i>Total ingresos (1+2)</i>	–	160,9	160,9	160,9	160,9	160,9
EGRESOS						
3. OPEX Planes (integridad + confiabilidad)	–	(136,5)	(136,5)	(136,5)	(136,5)	(136,5)
3a. OPEX implementación (SAP/capacitación)	(5,0)	–	–	–	–	–
EBITDA	–	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4
4. Depreciación	–	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
Utilización desp. de Imp. (27 %)	–	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8
5. (+) Depreciación	–	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6. (–) ΔNWC (stock + kits)	(57,7)	–	–	–	–	+57,7
FLUJO DE CAJA LIBRE	(62,7)	17,8	17,8	17,8	17,8	75,5

11.2.4. Análisis de Sensibilidad y Conclusión Financiera

Para validar la viabilidad económica de la estrategia de mantenimiento propuesta, se han calculado los indicadores clásicos de evaluación de proyectos (VAN, TIR y Payback) basándose en el Flujo de Caja Libre (FCL) proyectado. A continuación, se detalla la metodología de cálculo utilizada.

Valor Actual Neto (VAN) Este indicador mide la riqueza generada por el trabajo en dinero de hoy, descontando los flujos futuros a una tasa de costo de capital. Para este trabajo, con una inversión inicial I_0 de 62,7 kUSD y flujos constantes, se utiliza la siguiente expresión:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FCL_t}{(1+k)^t} \quad (13)$$

Donde:

- I_0 : Inversión inicial (CAPEX) = 62,7 [kUSD].
- FCL_t : Flujo de Caja Libre del periodo $t = 17,8$ [kUSD] (Escenario Base).
- k : Tasa de descuento = 10 %.
- n : Horizonte de evaluación = 5 años.

El resultado positivo de **40.8 kUSD** en el escenario base indica que el ahorro generado cubre la inversión, el costo del capital y genera un excedente de riqueza.

Tasa Interna de Retorno (TIR) Corresponde a la tasa de descuento intrínseca que hace que el VAN del trabajo sea igual a cero. Representa la rentabilidad máxima que ofrece el proyecto independientemente del financiamiento externo. Se obtiene resolviendo la ecuación:

$$0 = -62,7 + \sum_{t=1}^5 \frac{17,8}{(1+TIR)^t} \Rightarrow TIR \approx 27,3\% \quad (14)$$

Periodo de Recuperación (Payback) Determina el tiempo necesario para que la suma acumulada de los flujos de caja libre iguale a la inversión inicial. Dado que los flujos son constantes en el escenario base:

$$Payback = \frac{I_0}{FCL_{promedio}} = \frac{62,7}{29,3} \approx 3,5 \text{ años} \quad (15)$$

Tabla 42: Síntesis de indicadores económicos (escenario base)

Indicador	Valor
VAN (10 %)	40,8 kUSD
TIR	27,3 %
Payback simple	3,5 años

Cálculo del Punto de Equilibrio Operacional (Break-even) Este es el indicador más crítico para la toma de decisiones operativas. Se busca determinar la **Eficacia Mínima** (H_{min}) en horas de producción ganadas necesaria para que el proyecto no destruya valor ($VAN = 0$).

La ecuación de equilibrio iguala el Valor Presente de los Costos con el Valor Presente de los Beneficios:

$$VP(Costos) = VP(Ahorro_{repuestos}) + VP(Riesgo \times H_{min}) \quad (16)$$

Despejando la variable H_{min} (horas ganadas):

$$H_{min} = \frac{VP(Inversión + Operación) - VP(Ahorro_{repuestos})}{VP(Costo_Detención_Hora)} \quad (17)$$

Para ello, primero determinamos el Valor Presente (VP) de los flujos de costos y beneficios fijos utilizando la tasa de descuento $k = 10\%$ y el factor de anualidad para $n = 5$ años ($F_{anualidad} = 3,7908$):

1. VP Inversión y Operación (Egresos):

$$VP_{Egresos} = I_0 + OPEX \times F_{anualidad}$$

$$VP_{Egresos} = 62,7 + (136,5 \times 3,7908) = \mathbf{580,3 \text{ [kUSD]}}$$

2. VP Ahorro Repuestos (Ingreso Fijo):

$$VP_{Ahorro} = Ahorro_{anual} \times F_{anualidad}$$

$$VP_{Ahorro} = 46,6 \times 3,7908 = \mathbf{176,6 \text{ [kUSD]}}$$

3. VP Costo Detención Unitario (Inductor):

$$VP_{CostoHr} = Costo_Hr \times F_{anualidad}$$

$$VP_{CostoHr} = 114,3 \times 3,7908 = \mathbf{433,3 \text{ [kUSD/hora]}}$$

La ecuación de equilibrio iguala el Valor Presente de los Costos con el Valor Presente de los Beneficios:

$$VP_{Egresos} = VP_{Ahorro} + (VP_{CostoHr} \times H_{min}) \quad (18)$$

Despejando la variable H_{min} (horas ganadas) y reemplazando los valores calculados:

$$H_{min} = \frac{VP_{Egresos} - VP_{Ahorro}}{VP_{CostoHr}} = \frac{580,3 - 176,6}{433,3} \quad (19)$$

$$H_{min} = \frac{403,7}{433,3} = \mathbf{0,93 \text{ [horas/año]}} \quad (20)$$

Al realizar el cálculo riguroso en el flujo de caja descontado (Tabla de sensibilidad), se obtiene que con solo evitar **0,93 horas de detención no programada al año**, el beneficio económico iguala los costos de implementación. Cualquier ganancia de disponibilidad por sobre este umbral genera utilidad neta directa.

Tabla 43: Sensibilidad de los indicadores financieros ante variaciones en disponibilidad ganada

Escenario	Eficacia del Plan (Horas prod. ganadas)	VAN (kUSD)	TIR (%)	Payback
Pesimista	0.50 horas/año	(-118)	N/A	Indeterminado
Punto de Equilibrio	0.93 horas/año	0.0	10 %	3.8 años
Base (Realista)	1.00 horas/año	40.8	27.3 %	3,5 años
Optimista	2.00 horas/año	357.6	130 %	0,6 años

11.3. Impacto esperado de los planes de mantenimiento

La transición desde un esquema predominantemente reactivo hacia una estrategia de Integridad de Activos y Mantenimiento Basado en Riesgo genera impactos técnicos y económicos cuantificables en la operación. La evaluación del impacto se fundamenta en la mitigación directa de los modos de falla críticos identificados mediante el análisis FMEA y en su traducción a términos operacionales y financieros a través del análisis costo-riesgo desarrollado en la Fase IV.

El impacto del proyecto se estructura en tres pilares complementarios.

11.3.1. Incremento de la Confiabilidad Operacional (Reducción de la Tasa de Falla)

El diagnóstico inicial evidencia una gestión de mantenimiento sobrecargada por avisos correctivos no planificados (M1), originados principalmente por degradación no controlada de válvulas y obstrucción progresiva de ductos de agua de proceso.

- **Situación Actual:** El sistema opera bajo una lógica de operar hasta fallar en activos críticos, lo que deriva en eventos imprevistos con altos tiempos de logística, coordinación y reparación (MTTR elevado), además de una elevada variabilidad en la programación de mantenimiento.
- **Mejora Técnica:** La aplicación sistemática de la matriz ERL, junto con planes matrices basados en RCM, permite reemplazar fallas funcionales imprevistas por intervenciones programadas, transformando eventos reactivos en actividades planificadas.
- **Indicador de Éxito:** En coherencia con el análisis económico, se establece como métrica mínima de desempeño la reducción de 0,93 horas/año de detención no programada en la línea SAG, valor que corresponde al punto de equilibrio económico del proyecto.
- **Proyección:** La implementación de planes preventivos con frecuencias de 12 y 24 semanas permite convertir aproximadamente el 40 % de los avisos M1 en órdenes planificadas (M4). Esta proporción se sustenta en la experiencia histórica de activos con planes sistemáticos y en la eliminación de modos de falla dominantes asociados a desgaste e incrustación. El efecto neto es una reducción de la incertidumbre operativa y una mejora en la confiabilidad funcional del sistema.

11.3.2. Recuperación de la Eficiencia Hidráulica

En sistemas de transporte de fluidos, resulta fundamental distinguir entre la mera operación del equipo y el cumplimiento efectivo de su función de diseño, es decir, la entrega del caudal requerido.

- **Condición degradada actual:** La incrustación progresiva reduce el diámetro efectivo de las tuberías ($D_{efec} < D_{nom}$), incrementando la pérdida de carga y desplazando el punto

de operación de bombas y equipos aguas abajo. Esta condición obliga a operar el sistema fuera de su rango óptimo, reduciendo el caudal de alimentación al molino y acercando la operación a zonas de inestabilidad hidráulica y cavitación.

- **Impacto de la estrategia de limpieza:** La aplicación de planes de hidrolimpieza basados en condición permite recuperar el área hidráulica efectiva y restituir el punto de operación al rango de diseño, mitigando la pérdida de eficiencia sin necesidad de reemplazo masivo de infraestructura.
- **Efecto operacional esperado:** La recuperación de la capacidad hidráulica elimina restricciones que actualmente obligan a reducir tonelaje o a utilizar configuraciones de bombeo menos eficientes. Este impacto, deliberadamente no monetizado en el flujo de caja para evitar doble conteo, constituye un beneficio adicional de carácter técnico-operacional.

11.3.3. Optimización del costo del ciclo de vida

El impacto del proyecto no se limita al ámbito técnico, sino que modifica estructuralmente la composición y el perfil de riesgo del gasto en mantenimiento.

- **Cambio en la estructura de costos:** La estrategia propuesta desplaza el gasto desde un esquema altamente variable y reactivo —caracterizado por compras urgentes, sobre costos logísticos y paradas imprevistas— hacia un modelo de costos fijos y controlados, sustentado en contratos de limpieza planificada y stock estratégico de activos críticos.
- **Evaluación de sostenibilidad económica:** Aunque el OPEX preventivo anual (136,5 kUSD) puede parecer elevado frente a la inacción, el análisis de sensibilidad demuestra que dicho costo es inferior al riesgo financiero asociado a la no disponibilidad del sistema. En términos estrictos, el plan se autofinancia al evitar aproximadamente 50 minutos de detención no programada por año, valor muy inferior a la experiencia histórica de la operación.

11.4. Hoja de ruta de escalabilidad

La metodología híbrida desarrollada en esta memoria (integración de norma API 581 (RBM) para ductos con incrustación más RCM simplificado a válvulas y flujómetros) es una estrategia intelectual completamente replicable. Para escalar esta solución desde la línea piloto implementada en la caverna de la Molienda SAG hacia otras redes prioritarias de la Planta Concentradora como la Molienda Convencional, se propone la siguiente hoja de ruta de tres etapas:

11.4.1. Fase 1: Estandarización y digitalización de planes matrices (Corto Plazo)

El primer requisito para escalar la estrategia es desacoplar el conocimiento de las personas y transferirlo al sistema de gestión.

- **Creación de Ubicaciones Técnicas (UT):** Estandarización de la estructura de activos, asegurando que cada tramo de tubería y cada válvula disponga de una ubicación técnica única, condición indispensable para la trazabilidad y análisis histórico.
- **Carga de Datos SAP:**
Implementación progresiva de los planes matrices y hojas de ruta en SAP PM, sincronizada con la estabilización de los avisos de trabajo para evitar sobrecarga administrativa durante la transición

11.4.2. Fase 2: Expansión de planes matrices (Mediano Plazo)

Una vez estabilizada la línea piloto, la metodología puede extenderse a sistemas con modos de falla homólogos.

1. Selección de Sistemas Candidatos:

Priorización de redes de agua u otros fluidos mediante la matriz de criticidad, enfocándose en activos con impacto operacional relevante.

2. Homologación de Planes: Adaptar los Planes

Adaptación de planes matrices existentes a nuevos diámetros y metalurgias, evitando el rediseño completo de estrategias y reduciendo el costo de implementación.

11.4.3. Fase 3: Cultura de Mantenimiento (Largo Plazo - Continuo)

La sostenibilidad del modelo depende fundamentalmente del factor humano.

- **Capacitación Técnica:** Formación sistemática de mantenedores, supervisores y personal operativo en las nuevas pautas de inspección y ejecución de planes matrices.
- **Gestión del Cambio:**
Fomento de la disciplina en la generación de avisos estandarizados, mejorando la calidad de la información y facilitando la detección temprana de fallas y la correcta ejecución de las estrategias definidas.

12. Conclusiones y Sugerencias

12.1. Sugerencias

A partir de los resultados obtenidos y considerando el alcance definido para la presente memoria, se proponen las siguientes recomendaciones técnicas y de gestión para facilitar la implementación efectiva de la estrategia y asegurar su evolución hacia estándares de mantenimiento de alto nivel.

Gestión e Implementación de la Estrategia

- **Implementación progresiva en SAP PM:** La carga masiva de planes matrices puede distorsionar los KPI de cumplimiento de la Superintendencia. Se recomienda una implementación escalonada, priorizando las ubicaciones técnicas de mayor riesgo identificadas. Este enfoque permite estabilizar la gestión administrativa y evitar la sobrecarga operacional en las etapas de adopción inicial.
- **Gobernanza y retroalimentación del modelo:** Es fundamental establecer un repositorio formal para los planes matrices. La retroalimentación sistemática de los resultados reales de inspección debe utilizarse para ajustar el Factor de Daño (D_f) del modelo, transformando el plan de mantenimiento en una herramienta viva basada en la condición real y no solo en supuestos históricos.
- **Optimización de técnicas de mitigación:** Dada la alta incidencia de OPEX en hidrolimpiezas de alta presión, se sugiere evaluar tecnologías no invasivas como dispositivos de inducción electromagnética o tratamiento por frecuencia. Estas tecnologías podrían modificar la estructura del carbonato de calcio para reducir su adherencia, extendiendo los intervalos entre limpiezas mecánicas.

Para profundizar los beneficios de esta memoria y avanzar en la madurez del modelo de riesgos, se proponen las siguientes líneas de investigación para futuros trabajos de titulación o desarrollos internos:

- **Modelación CFD de la Red con Rugosidad Variable:** Desarrollar un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) que integre la rugosidad superficial dinámica analizada en esta memoria. Esto permitiría predecir con exactitud las zonas de estancamiento y mayores gradientes de presión donde la tasa de deposición es más agresiva.
- **Estudio de Correlación Química Dinámica:** Investigar la relación directa entre la variabilidad de la dureza del agua (asociada a eventos climáticos o cambios en la alimentación de la planta) y la cinética de incrustación. El objetivo es dinamizar la Probabilidad de Falla (PoF) en función de la composición química del fluido en tiempo real.
- **Monitoreo en línea e integración con Machine Learning:** Avanzar hacia el uso de sensores de presión diferencial conectados al DCS para alimentar modelos de aprendizaje supervisado. Esto permitiría automatizar la alerta de “Riesgo No Tolerable”, eliminando la subjetividad de las inspecciones manuales y alineando a la División Andina con las prácticas de mantenimiento predictivo.

12.2. Conclusiones

Tras el desarrollo de la estrategia de mantenimiento centrada en riesgos para la red de agua de procesos, se establecen las siguientes conclusiones técnicas:

Se logró la cuantificación del Riesgo Operacional, determinando que el fenómeno de incrustación de carbonatos en la red SAG progresa a una tasa lineal de 8,76 mm/año. Esta cinética de daño reduce el área hidráulica en un 31 % en un ciclo de 18 meses para ductos de 24 pulgadas, traduciéndose en una pérdida de capacidad de transporte superior al 40 %. Este hallazgo valida técnicamente el umbral de falla funcional definido en esta memoria y justifica la urgencia de abandonar el mantenimiento puramente reactivo.

La eficacia de la jerarquización mediante la integración RCM-RBI permitió diagnosticar que, si bien históricamente el 100 % de la red operaba bajo falla, solo el 4 % de las válvulas posee un contexto operacional que permite un mantenimiento correctivo (*run-to-failure*). El 96 % restante requiere estrategias preventivas o predictivas. En cuanto a los ductos, se identificó que el 54,5 % requiere una recuperación inmediata de integridad física, para posteriormente integrar al 91 % de la red en planes de inspección y monitoreo (focalizados en el tramo crítico de alimentación al molino SAG).

Se estableció con éxito la viabilidad económica y el umbral de rentabilidad. El análisis financiero arroja un VAN de 40,8 kUSD, lo que significa que el proyecto genera riqueza neta para la División por sobre la tasa de descuento exigida. La TIR del 27 % supera con creces el costo de capital, confirmando la alta rentabilidad de la inversión frente a otras alternativas. Asimismo, el Payback de 3,5 años asegura una recuperación rápida del capital invertido. El punto de equilibrio (*Break-even*) se sitúa en una reducción de apenas 0,93 horas/año de detención; dado que los eventos históricos superan ampliamente este margen, la rentabilidad del proyecto está garantizada bajo condiciones operativas realistas.

Finalmente, se cumple con el objetivo general al entregar un diseño de estrategia que no solo cumple con el estándar SOMA de Codelco, sino que reduce la incertidumbre operacional mediante la normalización de frecuencias genéricas de falla. Esto permite a la Superintendencia de Infraestructura auditar el riesgo de la red en tiempo real dentro del sistema SAP PM, transformando datos dispersos en información estratégica para la toma de decisiones.

Esta memoria de titulación trasciende la teoría del mantenimiento para proponer una solución estructural a un problema crítico de la Molienda SAG. La transición desde una gestión reactiva hacia un modelo de mantenimiento basado en riesgo constituye un cambio de paradigma necesario para la minería moderna, donde la disponibilidad hidráulica es directamente proporcional a la continuidad de la producción de cobre. El modelo aquí desarrollado no solo optimiza el uso de recursos al focalizarlos donde el riesgo es mayor, sino que dota a la organización de una metodología replicable, auditable y escalable a otros sistemas de piping dentro de la Planta Concentradora. En definitiva, la implementación de esta estrategia asegura que la gestión de activos deje de ser una respuesta al daño ocurrido y se convierta en una ventaja competitiva que resguarda la integridad física de los activos y la estabilidad financiera de la operación.

Bibliografía

- [1] Codelco (2025). *Historia Codelco*. Recuperado de <https://www.codelco.com/nosotros/la-corporacion/historia>
- [2] Codelco (2025). *Codelco, la empresa de todos los chilenos y chilenas*. Recuperado de <https://www.codelco.com/nosotros/codelco-la-empresa-de-todos-los-chilenos-y-chilenas#:~:text=El%20nombre%20Codelco%20representa%20a,clientes%20en%20todo%20el%20mundo>.
- [3] Codelco (2025). *Página Principal*. Recuperado de <https://www.codelco.com/>
- [4] Codelco (2024). *Memoria Anual 2024*. Recuperado de <https://www.codelco.com/memoria2024/flipbook/#page=1>
- [5] Codelco (2024). *Carta de Valores 2024*. Recuperado de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20110225/20110225165207/240509_carta_de_valores.pdf
- [6] Codelco (2025). *Codelco División Andina 2025*. Recuperado de <https://www.codelco.com/operaciones/andina/division-andina>
- [7] Cochilco. (2024). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales*. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/web/anuario-de-estadisticas-del-cobre-y-otros-minerales/#867-995-2025-1756211664>
- [8] Gerencia Corporativa de Mantenimiento. (2022). Recuperado de **Libro del Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA)**. *Codelco, Vicepresidencia de Abastecimiento*.
- [9] Gerencia de Mantenimiento, Superintendencia de Confiabilidad División Andina. (s.f.). Recuperado de **WorkBook SOMA**. *Codelco Andina*.
- [10] Codelco (2021). Recuperado de **Libro FULL POTENCIAL (Indicadores y Metas)**.
- [11] Cochilco, C. C. d. C. (2023). Histórico - precio de los metales. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/web/historico-precio-de-los-metales/>
- [12] Moubray, J. (2000). **Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM II)**. *Segunda Edición. Industrial Press Inc.*
- [13] Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. United States Department of Defense.
- [14] Smith, A. M. (2003). *Reliability-Centered Maintenance*. McGraw-Hill Education.
- [15] Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [16] Smith, D. J. (2022). *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers* (10th ed.). Butterworth-Heinemann
- [17] Neira, M. (2006). *Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile* [Memoria de título, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. Recuperado de https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2006/neira_m/sources/neira_m.pdf

- [18] Instituto Nacional de Normalización. (2005). *Norma Chilena Oficial NCh409/1.Of2005: Agua potable - Parte 1 - Requisitos*. Declarada oficial por Decreto Exento N° 446 del Ministerio de Salud, publicado el 27 de junio de 2006. Recuperado de <https://www.ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh409.pdf>
- [19] Amjad, Z. (1995). *Mineral Scale Formation and Inhibition*. Springer.
- [20] World Health Organization. (2004). *Guidelines for Drinking-water Quality* (3rd ed.). WHO Press.
- [21] Fontana, M. G. (1986). *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill.
- [22] API. (2016). *API Recommended Practice 581: Risk-Based Inspection Methodology* (3rd ed.). American Petroleum Institute.
- [23] CODELCO, Gerencia de Planta. (2025). *Informe Final Prueba Industrial Inhibidor de Incrustación SG 9735*. CODELCO, División Andina.
- [24] Ryznar, J. W. (1944). A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water. *Journal of the American Water Works Association*, 36(4), 472–486.
- [25] Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- [26] Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). *Chemistry for Environmental Engineering and Science* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [27] Aburto Navarro, G. (2025). *Estudio Técnico de Incrustaciones y evaluación Económica de soluciones para este fenómeno en Sistema Piping en Codelco, División Andina* (Proyecto de Título). Universidad Adolfo Ibáñez.
- [28] Silva Bruna, T. C. (2023). *Propuesta de Plan de Inspección Basada en Riesgo a Planta de Transporte de Hidrocarburo* (Trabajo de Titulación). Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Viña del Mar.
- [29] Meneses Ramírez, E., More Palacios, K., Siccha Jara, U., Verástegui Cuba, G., & Espinoza Cruz, A. (2021). *Inspección Basada en el Riesgo (IBR-API RP 580)*.
- [30] Parra Márquez, C., & Crespo Márquez, A. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada a la Gestión de Activos: Desarrollo y aplicación práctica de un modelo de gestión del mantenimiento* (2da ed.). Universidad Técnica Federico Santa María.
- [31] Tecnología Minera, Casos de éxito de mantenimiento predictivo en minería", 2025. <https://www.tecnologiaminera.cl/noticia/codelco-mantenimiento-predictivo>
- [32] Tecnología Minera, Casos de éxito de mantenimiento predictivo en minería", 2025. <https://www.tecnologiaminera.cl/noticia/rio-tinto-ia-mantenimiento>
- [33] Tecnología Minera, Casos de éxito de mantenimiento predictivo en minería", 2025. <https://www.tecnologiaminera.cl/noticia/vale-carajas-predictivo>
- [34] Tecnología Minera, Casos de éxito de mantenimiento predictivo en minería", 2025. <https://www.tecnologiaminera.cl/noticia/anglo-american-seguridad>

- [35] Fracttal, ".El futuro del mantenimiento industrial: 6 tendencias tecnológicas", 2025. <https://www.fracttal.com/blog/tendencias-mantenimiento-2025>
- [36] CMC Latam, "Monitoreo de condición e IoT", 2025. <https://www.cmclatam.com/monitoreo-condicion-iot>
- [37] FlyBross, "La termografía con drones: una revolución en la inspección", 2025. <https://www.flybross.com/termografia-drones>
- [38] CIIT Latam Congress, "Caso de estudio: retorno de inversión en mantenimiento proactivo", 2025. <https://www.ciitlatam.org/minecare-roi-mantenimiento>
- [39] Acoem, "Solución de monitoreo de tuberías", 2025. <https://www.acoem.com/nexti4-monitoring-pipes>
- [40] SensorGroup, "Smart Pipe Monitoring", 2025. <https://www.sensorgroup.com/smart-pipe-monitoring>
- [41] FasterCapital, "Monitoreo de tuberías con sensores y SCADA", 2025. <https://www.fastercapital.com/scada-monitoring-pipes>
- [42] Gerencia Corporativa de Mantenimiento. (2023). **Modelo de Gestión de Infraestructura Crítica**. *Vicepresidencia de Recursos Mineros, Desarrollo e Innovación, Codelco*. Código: GCM-M-001, Revisión: 01.
- [43] Gerencia Corporativa de Mantenimiento. (2023). **Estándar de Datos Maestros Módulo PM (SAP)**. *Codelco, Vicepresidencia de Recursos Mineros, Desarrollo e Innovación*. Código: GCM-E-001, Revisión: 01.
- [44] Gerencia Corporativa de Mantenimiento. (2023). **Modelo de Gestión de Infraestructura Crítica**. *Vicepresidencia de Recursos Mineros, Desarrollo e Innovación, Codelco*. Código: GCM-M-001, Revisión: 01.
- [45] Emerson. (2021). *Clarkson Modelo KGD: Válvulas de guillotina para lodos* (Datos técnicos). Emerson Automation Solutions.
- [46] Bray International, Inc. (2021). *Serie 762: Válvulas de cuchilla bidireccionales para Slurry - Bray Slurryshield* (Manual de Instalación, Funcionamiento y Mantenimiento). Bray.com.
- [47] Bray International, Inc. (2016). *Urethane Bidirectional Series Knife Gate Valve: Series 746* (Operation and Maintenance Manual). Bray/VAAS Division.
- [48] Bray International, Inc. (2021). *Serie McCannalok: Válvula mariposa de alto rendimiento* (Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento). Bray.com.
- [49] Frankel, M. (2010). *Facility Piping Systems Handbook: For Industrial, Commercial, and Healthcare Facilities* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

A. Anexos

A.1. Activos críticos en el sistema de tuberías

Es fundamental señalar la existencia de fluidos como la lechada de cal (CAL) y el agua de la red contra incendios, definidos como activos críticos debido a su alto impacto potencial en la seguridad de las personas y/o el medio ambiente. El análisis de la base de datos histórica revela que ambos activos generan avisos de trabajo con una criticidad elevada.

Desde la perspectiva de activo crítico, la planta de cal resulta esencial, puesto que una posible rotura o falla en sus tuberías de transporte puede desencadenar una detención de la producción. Por consiguiente, asegurar su disponibilidad en el suministro de cal es indispensable para la continuidad operacional. Por su parte, la red contra incendios genera avisos no planificados y sufre constantes roturas por congelamiento de tuberías y válvulas, principalmente en las zonas de proceso de chancado primario, secundario y fino. El contexto operacional presente en estas áreas expone a estas líneas a temperaturas bajo cero. Además, a esta condición se suma que el flujo de agua permanece estático durante gran parte del tiempo, ya que solo se utiliza para combatir riesgos de incendio, por lo que la red contra incendios se considera un activo crítico que debe garantizar disponibilidad permanente.

Dentro del levantamiento de información realizado para los fluidos en estudio, se determinó que la planta de cal original está siendo desmantelada actualmente. En paralelo, se utiliza una planta de cal móvil mientras la Vicepresidencia de Proyectos lleva a cabo los trabajos de ingeniería necesarios para la rehabilitación de la planta. La problemática del constante congelamiento en la red contra incendios está siendo abordada mediante la implementación de cintas calefactoras, cuyo objetivo es mantener la temperatura adecuada del fluido.

A.2. Cálculo de la pérdida de capacidad de transporte

La estimación de una caída de caudal superior al 40 % se fundamenta en la mecánica de fluidos para sistemas gravitacionales (carga hidráulica constante). A diferencia de los sistemas de bombeo, donde la bomba busca un nuevo punto de operación en su curva, en un sistema por gravedad la energía disponible es fija (ΔH), por lo que cualquier aumento en la resistencia se traduce directamente en una reducción de flujo.

La relación funcional entre el caudal (Q) y el diámetro efectivo para una pérdida de carga fija se deriva de la ecuación de Darcy-Weisbach simplificada:

$$Q \propto \sqrt{\frac{D^5}{f}} \quad (21)$$

Evalutando el impacto del nuevo umbral de espesor crítico $d_{crit} = 50$ mm:

1. **Efecto geométrico (D):** La reducción del diámetro hidráulico de 590,5 mm a 490,5 mm genera una pérdida de capacidad base drástica, regida por la potencia 2.5 del diámetro:

$$\frac{Q_{geo}}{Q_{inicial}} = \left(\frac{490,5}{590,5}\right)^{2,5} \approx 0,628 \quad (\text{Caída del 37.2 \%}) \quad (22)$$

Este valor representa el límite inferior del rango, considerando únicamente la restricción de área transversal. Es decir, solo por reducción de espacio, el sistema pierde más de un tercio de su capacidad.

2. **Efecto de rugosidad (f):** Según datos de caracterización de incrustaciones en la planta [27], la rugosidad absoluta de la superficie incrustada ($\varepsilon_{inc} \approx 261 \mu\text{m}$) es significativamente mayor a la del acero ($\varepsilon_0 = 30 \mu\text{m}$).

Aunque la rugosidad absoluta se mantiene constante respecto a capas más delgadas, la **Rugosidad Relativa** (ε/D) aumenta al disminuir el diámetro D . Esto incrementa el factor de fricción de Darcy (f) en el denominador de la ecuación, añadiendo una pérdida de carga hidrodinámica estimada entre un 5 % y 8 % adicional a la pérdida geométrica.

Conclusión Hidráulica: La combinación del efecto geométrico puro (≈ 37 %) y el incremento del factor de fricción valida técnicamente una reducción de caudal total en el rango de 42 % a 45 %.

Esta magnitud de pérdida confirma que $d_{crit} = 50$ [mm] no es solo un punto de ineficiencia, sino el límite de colapso hidráulico del sistema, donde el caudal remanente es insuficiente para sostener la operación del molino incluso en regímenes de baja carga, forzando la detención para limpieza correctiva.

A.3. Impacto en equipos y pérdidas de producción

En el presente anexo se explica en detalle los datos técnicos asociados a las líneas de la molienda SAG y la molienda convencional, lo cual se detallan sus diagramas de flujo y fichas técnicas de los molinos.

Línea molienda SAG.

La molienda SAG es uno de los procesos productivos más importantes dentro de la planta concentrado debido al gran procesamiento de material que este trabaja por hora, provocando que sea una activo crítico e indispensable para la división.

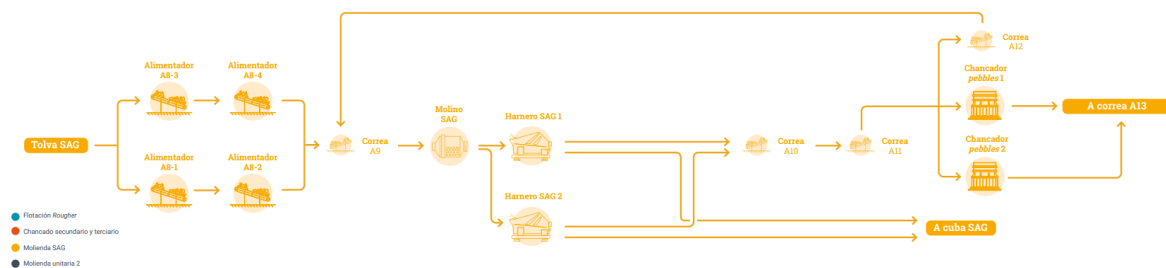


Figura A1: Diagrama de flujos línea SAG.

Fuente: Libro Full Potencial Codelco [10].

El equipo crítico a evaluar dentro de la red será el molino SAG siendo uno de los equipos más grandes en cuanto a dimensión y procesamiento de material.

Tabla 44: Ficha técnica - molino SAG

Fuente: Libro Full Potencial [10].

Característica	Valor
Marca	Siemens
Cantidad	1
Dimensiones (ancho y largo)	4,88 m x 10,92 m
Potencia	16.000 HP
Rendimiento	2.011 tph

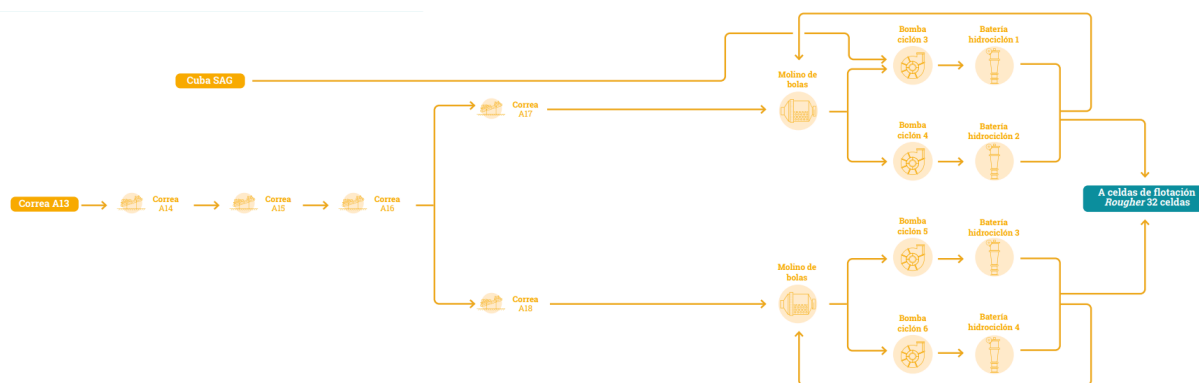


Figura A2: Diagrama de flujos línea SAG molino de bolas 1 y 2.

Fuente: Libro Full Potencial Codelco [10].

En la continuación del diagrama de flujo, los equipos a considerar son el molino de bolas 1 y 2.

Tabla 45: Ficha técnica - molino de bolas 1 y 2.

Fuente: Libro Full Potencial [10].

Característica	Valor
Marca	Svedalla
Cantidad	1
Dimensiones (ancho y largo)	6,10 m x 9,14 m
Potencia	7.500 HP
Rendimiento	1.006 tph

Línea molienda convencional

En la molienda convencional se tiene un proceso de múltiples equipos los cuales trabajan en serie durante el proceso de producción de cobre. Aquí los equipos críticos a evaluar serán los molinos de barras del 1 al 3 y los molinos de bolas de del 1 al 9.

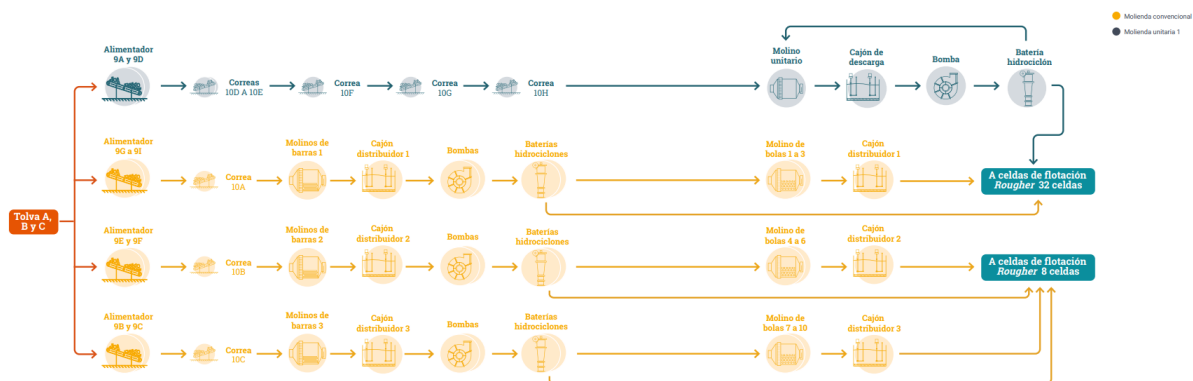


Figura A3: Diagrama de flujos molienda convencional.
Fuente: Libro Full Potencial Codelco [10].

Tabla 46: Ficha técnica - molino de barras 1,2,3.

Fuente: Libro Full Potencial [10].

Característica	Valor
Modelo	3001 HP
Dimensiones (diámetro y largo)	3,81 m x 5,31 m
Potencia	1.000 HP
Rendimiento	473 tph

Tabla 47: Ficha técnica - molinos de bolas 1 a 9.

Fuente: Libro Full Potencial [10].

Característica	Valor
Cantidad	3
Dimensiones (diámetro y largo)	3,96 m x 4,88 m
Potencia	1.700 HP
Rendimiento	158 tph

A.4. Tramo 3: Entrada túnel de servicio

La entrada del túnel de servicio esta compuesta por una válvula presente en en el anillo A SAG, además, se consideran 2 ductos asociados a la molienda SAG.

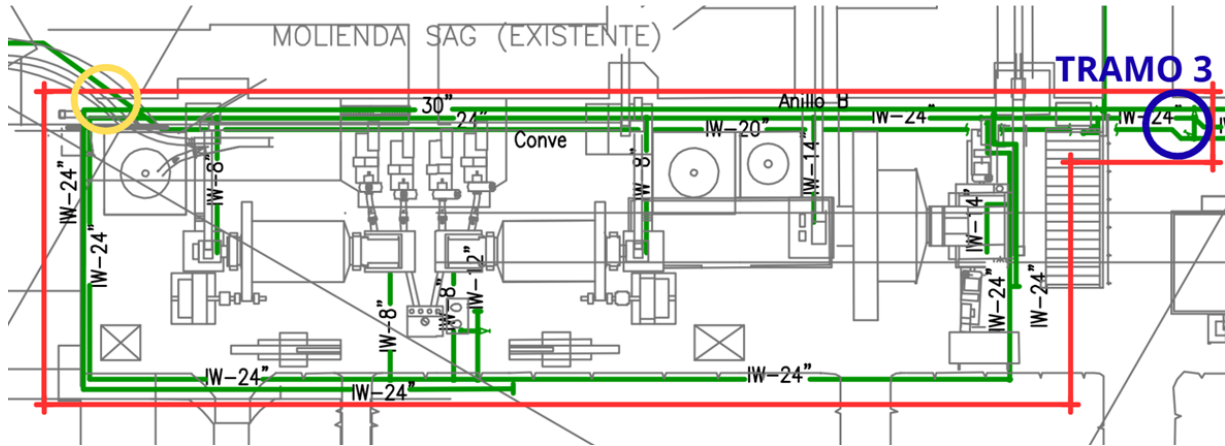


Figura A4: Tramo 3: Plano agua de procesos molienda SAG.

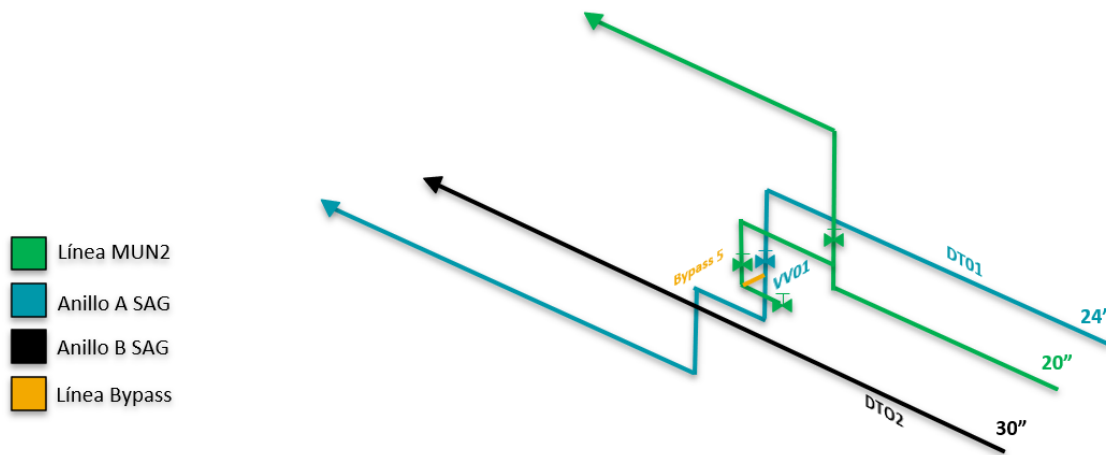


Figura A5: Tramo 3: Diagrama de distribución de ductos, válvulas y flujómetros.

Tabla 48: Tramo 3: Información técnica de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro
Anillo A	DT01	Acero Carbono	24"
Anillo B	DT02	Acero Carbono	30"

Tabla 49: Tramos 3: Información técnica de válvulas.

Línea	Válvula	Tipo	Diámetro
Anillo A	VV01	Guillotina neumática	24"

Cabe destacar que la válvula VV01 del anillo A presente en el tramo 3, fue cambiada durante el mantenimiento general del mes de octubre, donde su falla funcional fue la incapacidad de cumplir su función principal, la válvula perdió la capacidad de de controlar la apertura y cierre del flujo dentro de la tubería, se desconoce el mecanismo de daño asociado al activo.



Figura A6: Válvula VV01 - Tramo 3 anillo A SAG.

A.5. Tramo 5: Bajada chute, MoBo1 y chute MoBo 2

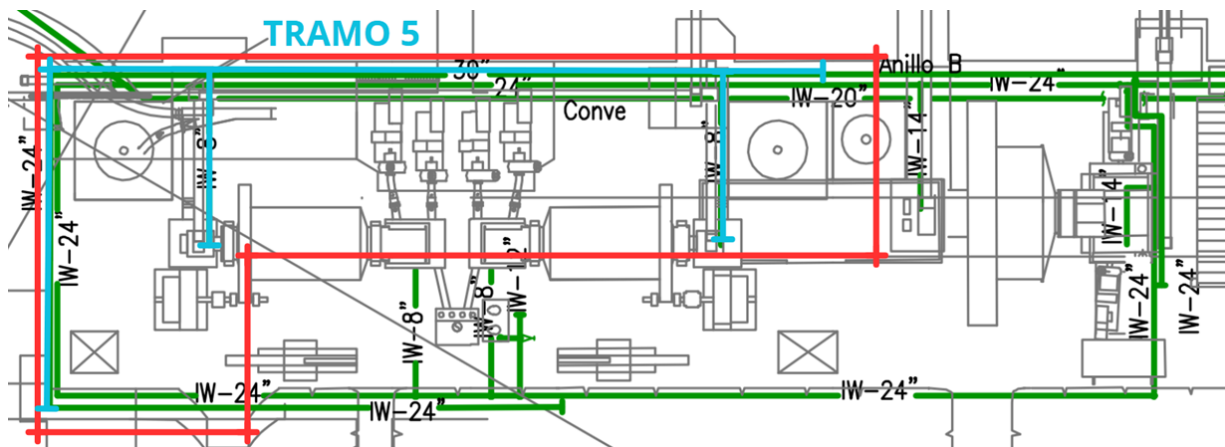


Figura A7: Tramo 5: Plano agua de procesos molienda SAG.

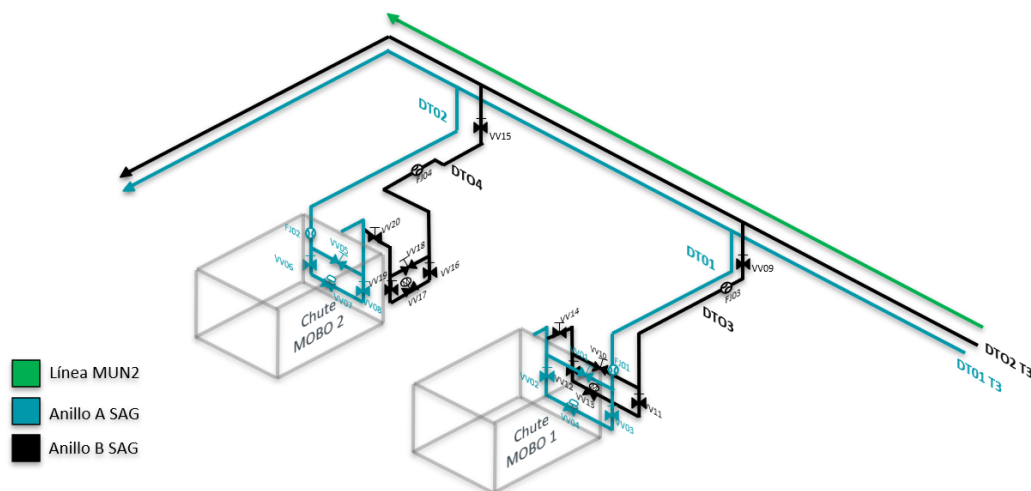


Figura A8: Tramo 5: Diagrama de distribución de ductos, válvulas y flujómetros.

Tabla 50: Tramo 5: Información técnica de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro
Anillo A	DT01	Acero Carbono	8"
	DT02	Acero Carbono	8"
Anillo B	DT03	Acero Carbono	8"
	DT04	Acero Carbono	8"

Tabla 51: Tramo 5: Información técnica de válvulas.

Línea	Ducto	Válvula	Tipo	Diámetro
Anillo A	DT01	VV01	Globo	8"
		VV02	Guillotina neumática	8"
		VV03	Guillotina neumática	8"
		VV04	Control Mariposa	8"
	DT02	VV05	Globo	8"
		VV06	Guillotina neumática	8"
		VV07	Control mariposa	8"
		VV08	Guillotina neumática	8"
Anillo B	DT03	VV09	Guillotina neumática	8"
		VV10	Globo	8"
		VV11	Guillotina neumática	8"
		VV12	Guillotina neumática	8"
		VV13	Mariposa motorizada	8"
		VV14	Guillotina neumática	8"
	DT04	VV15	Guillotina neumática	8"
		VV16	Guillotina neumática	8"
		VV17	Mariposa motorizada	8"
		VV18	Globo	8"
		VV19	Guillotina neumática	8"
		VV20	Compuerta	8"

Tabla 52: Tramo 5: Información técnica de flujómetros.

Línea	Ducto	Flujómetro	Diámetro
Anillo A	DT01	FJ01	8"
	DT02	FJ02	8"
Anillo B	DT03	FJ03	8"
	DT04	FJ04	8"

A.6. Tramo 6: Bajada cuba MoBo1 y cuba MoBo 2

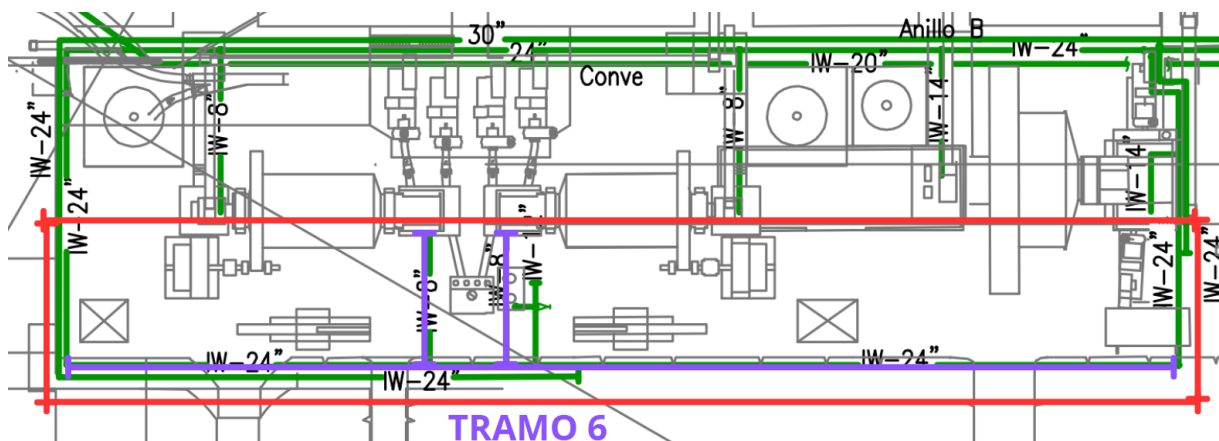


Tabla 54: Tramo 6: Información técnica de válvulas.

Línea	Ducto	Válvula	Tipo	Diámetro
Anillo B	DT05	VV01	Guillotina Neumática	10"
		VV02	Guillotina Neumática	10"
		VV03	Compuerta	10"
		VV04	Mariposa motorizada	10"
		VV05	Guillotina Neumática	10"
Anillo A	DT03	VV06	Globo	8"
		VV07	Compuerta	8"
		VV08	Mariposa motorizada	8"
		VV09	Compuerta	8"
Anillo B	DT04	VV10	Guillotina Neumática	10"
		VV11	Guillotina Neumática	10"
		VV12	Mariposa motorizada	10"
		VV13	Guillotina Neumática	10"
		VV14	Globo	10"
Anillo A	DT02	VV15	Mariposa	8"
	DT01	VV16	Guillotina Neumática	10"
		VV17	Globo	8"
		VV18	Compuerta	8"
		VV19	Control mariposa	8"
		VV20	Compuerta	8"

Tabla 55: Tramo 6: Información técnica de flujómetros.

Línea	Ducto	Flujómetro	Diámetro
Anillo B	DT05	FJ01	10"
	DT04	FJ02	10"
Anillo A	DT01	FJ03	8"
	DT03	FJ04	8"

A modo de conclusión del presente levantamiento realizado para los ductos, válvulas y flujómetros presentes en las líneas de tuberías de la molienda SAG.

la trazabilidad realizada contabilizo un total de:

- **Ductos: 22**
- **Válvulas: 66**
 - Guillotina neumática: 35
 - Globo: 8
 - Mariposa: 12
 - Compuerta: 11

■ Flujómetros: 14

Este resultado permite tener claridad de los diferentes tipos de activos de los cuales serán evaluados dentro de la aplicación de metodologías de criticidad y priorización.

A.7. Análisis de criticidad a linea SAG y Convencional

Para realizar el análisis de criticidad los fundamentos se basan un análisis previo donde se identifican las ubicaciones técnicas con mayor porcentaje de generación de avisos y fallas en sus tuberías y accesorios acoplados.

Tabla 56: Información técnica de ubicaciones a evaluar.

Proceso	Área	Subárea	Subárea 1	Activo	Descripción de activo	Ubicación técnica
Concentradora	Molienda	SAG	Líneas de agua de procesos	Tuberías y accesorios	N/A	ANCO-MO-ISG-LAP
Concentradora	Molienda	Convencional	Líneas de agua de procesos	Tuberías y accesorios	N/A	ANCO-MO-IMC-LAP

El análisis de criticidad se basó en la Fase B de la metodología corporativa SOMA, pero requirió ajustes específicos en la definición de impacto para reflejar la realidad del sistema de tuberías de agua de proceso. Para el impacto P1 (Seguridad) se establecieron nuevos estándares de impacto en las personas ya que los existentes no se ajustaban a las catástrofes producidas en una falla de piping.

También el parámetro P3 (Producción) se modificó tras el diálogo con el personal de Codelco. La escala original de SOMA, orientada a la detención total del proceso, no capturaba adecuadamente la consecuencia de una falla en el piping, que a menudo se manifiesta como una Reducción de la Capacidad de Tratamiento en los molinos (Molino SAG/MoBo). Esta redefinición es crucial, ya que permite que la puntuación de criticidad discrimine con precisión el impacto operativo de las líneas evaluadas, alineando la métrica con la eficiencia del proceso productivo y no únicamente con la indisponibilidad horaria total, garantizando que el análisis de riesgo sea funcionalmente representativo.

De manera similar, se adaptó el parámetro P4 (Costos de Mantenimiento). La escala base de SOMA presenta rangos monetarios diseñados para activos de capital extremadamente costosos (por ejemplo, costos superiores a US\$ 500.000), lo cual resulta excesivo para la evaluación de componentes unitarios de piping como ductos, válvulas y flujómetros. Mantener la escala original provocaría una clasificación difusa o sistemáticamente baja de estos activos, invalidando su análisis por costo. Por lo tanto, se ajustaron los umbrales monetarios de la escala P4 para lograr una discriminación de costos más sensible y apropiada al valor de reposición y reparación de los componentes del pipeline.

B. Análisis de riesgo y criticidad aplicado a los tramos de la molienda SAG.

Análisis de criticidad aplicado a los activos identificados en el levantamiento de las líneas de tuberías de la molienda SAG.

TRAMO 3

Tabla 57: Tramo 3: Determinación de consecuencias de fallas de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF
Anillo A	DT01	Acero Carbono	24"	12	0	0	5	17	3
Anillo B	DT02	Acero Carbono	30"	38	0	12	8	58	6

Tabla 58: Tramo 3: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diametro	t	Art	Dfincrust	PoF	FF	CoF	Riesgo
Anillo A	DT01	Acero Carbono	24"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
Anillo B	DT02	Acero Carbono	30"	2	0.3504	2	0.0000612	1	6	6

Tabla 59: Tramo 3: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.

Línea	Válvula	Tipo	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad/Riesgo
Anillo A	VV01	Guillotina Neumática	24"	38	0	0	10	48	6	4	24

TRAMO 4

Tabla 60: Tramo 4: Determinación de consecuencia de fallas de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF
Anillo A	DT01	Acero Carbono	24"	38	0	0	5	43	6
	DT02	Acero Carbono	10"	12	0	0	2	14	3
	DT03	Acero Carbono	10" → 8"	12	0	0	2	14	3
	DT04	Acero Carbono	16"	30	0	0	2	32	5
	DT05	Acero Carbono	14"	12	0	0	2	14	4
Anillo B	DT06	Acero Carbono	24"	38	0	0	5	43	6
	DT07	Acero Carbono	10"	12	0	0	2	14	3
	DT08	Acero Carbono	8"	12	0	0	2	14	3
	DT09	Acero Carbono	10" → 8"	12	0	0	2	14	3
	DT10	Acero Carbono	16"	30	0	12	5	47	6
	DT11	Acero Carbono	14" → 8"	12	0	12	2	26	4

Tabla 61: Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro	t	Art	Dfincrust	PoF	FF	CoF	Riesgo
Anillo A	DT01	Acero Carbono	24"	10	1.752	800	0.02448	4	6	24
	DT02	Acero Carbono	10"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
	DT03	Acero Carbono	10" → 8"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
	DT04	Acero Carbono	16" → 14"	10	1.752	800	0.02448	4	5	20
	DT05	Acero Carbono	14"	10	1.752	800	0.02448	4	4	16
Anillo B	DT06	Acero Carbono	24"	5	0.876	50	0.00153	3	6	18
	DT07	Acero Carbono	10"	5	0.876	50	0.00153	3	3	9
	DT08	Acero Carbono	8"	5	0.876	50	0.00153	3	3	9
	DT09	Acero Carbono	10" → 8"	5	0.876	10	0.000306	2	3	6
	DT10	Acero Carbono	16"	2	0.3504	2	0.0000612	1	6	6
	DT11	Acero Carbono	14" → 8"	2	0.3504	2	0.0000612	1	4	4

Tabla 62: Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.

Línea	Ducto	Válvula	Tipo	Diametro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad
Anillo A	DT02	VV01	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV02	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV03	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV04	Control mariposa	10"	0	0	0	5	5	2	5	10
		VV05	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
	DT03	VV06	Guillotina neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV07	Guillotina neumática	8"	0	0	0	2	2	1	4	4
	DT04	VV08	Guillotina neumática	14"	0	0	0	8	8	2	4	8
	DT05	VV09	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT04	VV10	Guillotina neumática	14"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV11	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
		VV12	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
		VV13	Compuerta	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
Anillo B	DT07	VV14	Globo	10"	12	0	0	8	20	4	2	8
		VV15	Guillotina neumática	10"	12	0	0	8	20	4	4	16
		VV16	Guillotina neumática	10"	12	0	0	8	20	4	4	16
		VV17	Control mariposa	10"	12	0	0	5	17	3	5	15
	DT09	VV18	Guillotina neumática	10"	12	0	0	8	20	4	4	16
	DT08	VV19	Guillotina neumática	8"	12	0	0	2	14	3	4	12
	DT10	VV20	Guillotina neumática	16"	30	0	12	10	52	6	4	24
		VV21	Guillotina neumática	16"	30	0	12	10	52	6	4	24
		VV22	Control mariposa	16"	30	0	12	5	47	6	5	30
		VV23	Compuerta	16"	38	0	12	5	55	6	2	12
		VV24	Guillotina neumática	16"	30	0	12	10	52	6	4	24
	DT11	VV25	Guillotina neumática	14"	12	0	0	8	20	4	4	16

Tabla 63: Tramo 4: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.

Línea	Ducto	Flujómetro	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad/Riesgo
Anillo A	DT03	FJ02	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT04	FJ04	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT05	FJ05	14"	0	0	0	5	5	2	3	6
Anillo B	DT07	FJ01	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT09	FJ03	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT10	FJ06	16"	0	0	0	5	5	2	3	6

TRAMO 5

Tabla 64: Tramo 5: Determinación de consecuencia de falla de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF
Anillo A	DT01	Acero Carbono	8"	12	0	0	2	14	3
	DT02	Acero Carbono	8"	12	0	0	2	14	3
Anillo B	DT03	Acero Carbono	8"	30	0	4	2	36	5
	DT04	Acero Carbono	8"	30	0	4	2	36	5

Tabla 65: Tramo 5: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diametro	t	Art	Dfincrust	PoF	FF	CoF	Riesgo
Anillo A	DT01	Acero Carbono	8"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
	DT02	Acero Carbono	8"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
Anillo B	DT03	Acero Carbono	8"	2	0.3504	2	0.0000612	1	5	5
	DT04	Acero Carbono	8"	2	0.3504	2	0.0000612	1	5	5

Tabla 66: Tramo 5: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.

Línea	Ducto	Válvula	Tipo	Diametro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad
Anillo A	DT01	VV01	Globo	8"	0	0	0	5	5	2	2	4
		VV02	Guillotina neumática	8"	0	0	0	2	2	2	4	8
		VV03	Guillotina neumática	8"	0	0	0	2	2	2	4	8
		VV04	Control mariposa	8"	0	0	0	5	5	2	5	10
	DT02	VV05	Globo	8"	0	0	0	5	5	2	2	4
		VV06	Guillotina neumática	8"	0	0	0	2	2	2	4	8
		VV07	Control mariposa	8"	0	0	0	5	5	2	5	10
		VV08	Guillotina neumática	8"	0	0	0	2	2	2	4	8
Anillo B	DT03	VV09	Guillotina neumática	8"	30	0	4	2	36	5	4	20
		VV10	Globo	8"	30	0	4	5	39	6	2	12
		VV11	Guillotina neumática	8"	30	0	4	2	36	5	4	20
		VV12	Guillotina neumática	8"	30	0	4	2	36	5	4	20
		VV13	Control mariposa	8"	30	0	4	5	39	6	5	30
		VV14	Guillotina neumática	8"	30	0	4	2	36	5	4	20
	DT04	VV15	Guillotina neumática	8"	30	0	4	2	36	5	4	20
		VV16	Guillotina neumática	8"	30	0	4	2	36	5	4	20
		VV17	Control mariposa	8"	30	0	4	5	39	6	5	30
		VV18	Globo	8"	30	0	4	5	39	6	2	12
		VV19	Guillotina neumática	8"	30	0	4	2	36	5	4	20
		VV20	Compuerta	8"	30	0	4	5	39	6	3	18

Tabla 67: Tramo 5: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.

Línea	Ducto	Flujómetro	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad/Riesgo
Anillo A	DT01	FJ01	8"	0	0	0	5	5	2	2	4
	DT02	FJ02	8"	0	0	0	5	5	2	2	4
Anillo B	DT03	FJ03	8"	0	0	0	5	5	2	2	4
	DT04	FJ04	8"	0	0	0	5	5	2	2	4

B.1. Tramo 5: Síntesis de riesgo y criticidad de activos

En el Tramo 5, la evaluación de activos revela un escenario operativo caracterizado por una menor dispersión en la criticidad de la instrumentación y una concentración intensiva de la criticidad funcional en el subsistema de válvulas del Anillo B.

A continuación, se presentan las distribuciones gráficas de riesgo y criticidad resultantes.

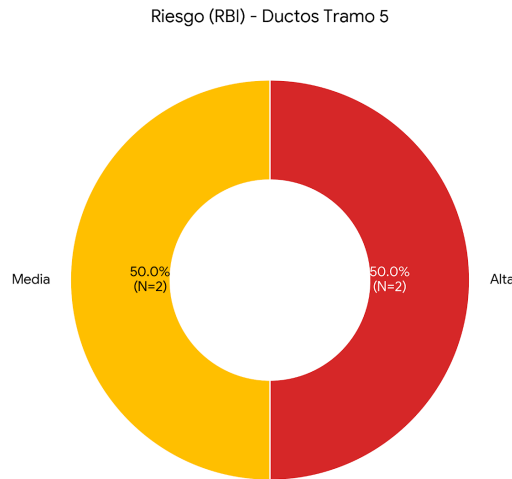


Figura A11: Distribución de nivel de riesgo a la integridad (RBI) en ductos del Tramo 5.

Para los ductos (Figura A11), se mantiene la dicotomía estructural del sistema: el 50% de los activos (Anillo A) presenta un riesgo Alto latente debido a la degradación histórica por incrustaciones, mientras que el 50% restante (Anillo B) opera bajo niveles de riesgo Medio, controlados mediante el monitoreo de condición actual. Esta simetría exacta facilita la segregación presupuestaria, CAPEX para renovación del Anillo A y OPEX para mantenimiento del Anillo B.

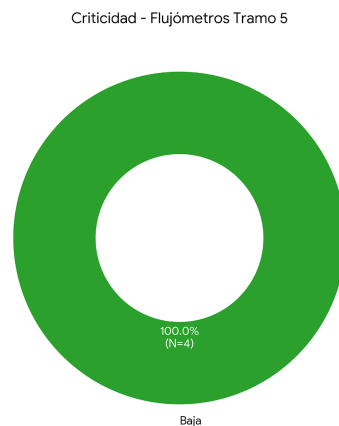


Figura A12: Perfil de criticidad funcional para instrumentación (flujómetros) en Tramo 5.

En contraste con el Tramo 4, la instrumentación del Tramo 5 (Figura A12) se ubica íntegramente en la zona de criticidad Baja (100 % Verde). Esto indica que la pérdida de señal de flujo en estos puntos específicos (Bajadas hacia el Chute MOBO 1 y 2) posee un un impacto marginal en el control global del proceso de molienda, permitiendo una estrategia de mantenimiento del tipo correctiva o verificaciones muy espaciadas, liberando horas-hombre para equipos más críticos.

Distribución de Criticidad y Tipo de Válvula - Tramo 5

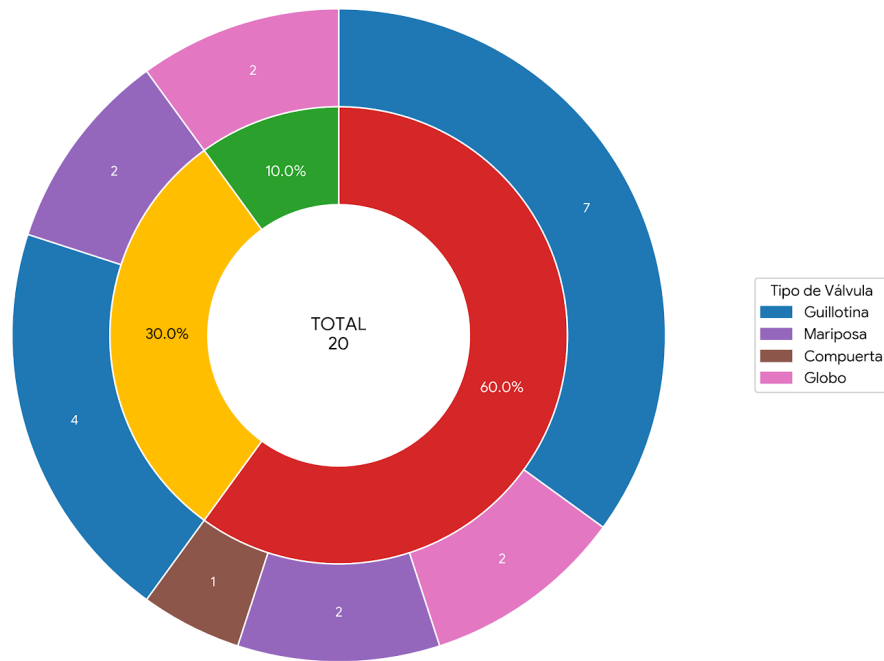


Figura A13: Distribución anidada de criticidad funcional (RCM) y tipología de válvulas en Tramo 5.

Finalmente, la Figura A13 expone la alta demanda de confiabilidad en el Anillo B. El 60 % de las válvulas del tramo son de criticidad Alta, siendo las válvulas de tipo **Guillotina** las protagonistas indiscutibles de este grupo crítico. El análisis desagregado sugiere dos acciones tácticas inmediatas:

1. Asegurar un stock de seguridad de sellos y actuadores para válvulas de guillotina de 8", dado que representan el modo de falla dominante con mayor impacto sistémico.
2. Implementar planes de mantenimiento preventivo estricto para las válvulas de control (Globo y Mariposa) del sector Alta, ya que su mal funcionamiento afectaría directamente la estabilidad hidráulica de la alimentación a molinos.

TRAMO 6

Tabla 68: Tramo 6: Determinación de consecuencias de falla de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF
Anillo A	DT01	Acero Carbono	10" × 8"	12	0	0	2	14	3
	DT02	Acero Carbono	8"	12	0	0	2	14	3
	DT03	Acero Carbono	8"	12	0	0	2	14	3
Anillo B	DT04	Acero Carbono	10"	30	0	12	2	44	6
	DT05	Acero Carbono	10"	30	0	12	2	44	6

Tabla 69: Tramo 6: Matriz de riesgo y criticidad de ductos.

Línea	Ducto	Material	Diametro	t	Art	Dfincrust	PoF	FF	CoF	Riesgo
Anillo A	DT01	Acero Carbono	10" → 8"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
	DT02	Acero Carbono	8"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
	DT03	Acero Carbono	8"	10	1.752	800	0.02448	4	3	12
Anillo B	DT04	Acero Carbono	10"	3	0.5256	25	0.000765	3	6	18
	DT05	Acero Carbono	10"	3	0.5256	25	0.000765	3	6	18

Tabla 70: Tramo 6: Matriz de riesgo y criticidad de válvulas.

Línea	Ducto	Válvula	Tipo	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad
Anillo B	DT05	VV01	Guillotina Neumática	10"	30	0	12	8	50	6	4	24
		VV02	Guillotina Neumática	10"	30	0	12	8	50	6	4	24
		VV03	Compuerta	10"	30	0	12	5	47	6	3	18
		VV04	Control mariposa	10"	30	0	12	5	47	6	5	30
		VV05	Guillotina Neumática	10"	30	0	12	8	50	6	4	24
Anillo A	DT03	VV06	Globo	8"	0	0	0	5	5	2	2	4
		VV07	Compuerta	8"	0	0	0	5	5	2	3	6
		VV08	Control mariposa	8"	0	0	0	5	5	2	5	10
		VV09	Compuerta	8"	0	0	0	5	5	2	3	6
Anillo B	DT04	VV10	Guillotina Neumática	10"	30	0	12	8	50	6	4	24
		VV11	Guillotina Neumática	10"	30	0	12	8	50	6	4	24
		VV12	Control mariposa	10"	30	0	12	5	47	6	5	30
		VV13	Guillotina Neumática	10"	30	0	12	8	50	6	4	24
		VV14	Compuerta	10"	30	0	12	5	47	6	3	18
Anillo A	DT02	VV15	Control mariposa	8"	0	0	0	5	5	2	5	10
	DT01	VV16	Guillotina Neumática	10"	0	0	0	8	8	2	4	8
		VV17	Globo	8"	0	0	0	5	5	2	2	4
		VV18	Compuerta	8"	0	0	0	5	5	2	3	6
		VV19	Control mariposa	8"	0	0	0	5	5	2	5	10
		VV20	Compuerta	8"	0	0	0	5	5	2	3	6

Tabla 71: Tramo 6: Matriz de riesgo y criticidad de flujómetros.

Línea	Ducto	Flujómetro	Diámetro	P1	P2	P3	P4	Total	CoF	FF (PoF)	Criticidad/Riesgo
Anillo B	DT05	FJ01	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT04	FJ02	10"	0	0	0	5	5	2	3	6
Anillo A	DT01	FJ03	8"	0	0	0	5	5	2	3	6
	DT03	FJ04	8"	0	0	0	5	5	2	3	6

B.2. Tramo 6: Síntesis de riesgo y criticidad de activos

El análisis del Tramo 6 presenta el escenario más desafiante desde la perspectiva de la integridad de activos estáticos, marcando un punto de inflexión respecto a los tramos precedentes. Aquí, la convergencia de mecanismos de daño en ambos anillos eleva el perfil de riesgo global del sector.

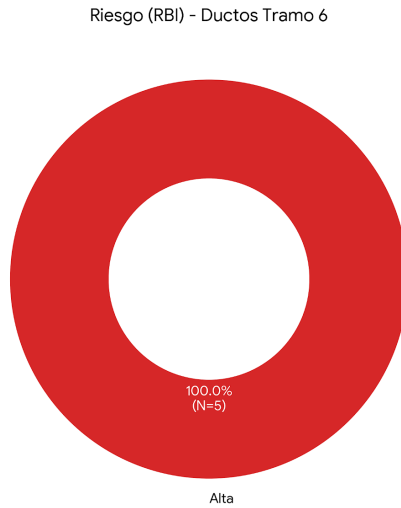


Figura A14: Distribución de nivel de riesgo a la integridad (RBM) en ductos del Tramo 6.

Como evidencia la Figura A14, el 100 % de los ductos evaluados se encuentra en nivel de riesgo Alto. A diferencia de los tramos anteriores donde existía una segregación clara (Anillo A degradado vs. Anillo B sano), en el Tramo 6 ambos subsistemas han superado los umbrales de aceptabilidad, ya sea por la severidad de la incrustación (Anillo A) o por la aceleración de la corrosión bajo tensión operativa (Anillo B). Esto clasifica al Tramo 6 como una Zona Roja prioritaria para la asignación de CAPEX en el próximo ciclo de paradas de planta.

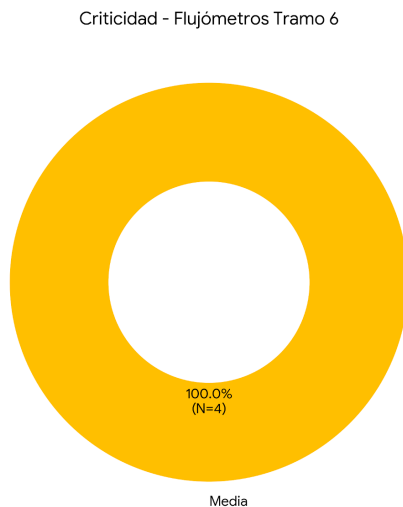


Figura A15: Perfil de criticidad funcional para instrumentación (flujómetros) en Tramo 6.

En cuanto a la instrumentación (Figura A15), se observa una estabilidad en el nivel de criticidad Medio. Los flujómetros de este sector son vitales para el control de balance local, pero cuentan con ventanas de tiempo suficientes para la intervención correctiva sin generar un impacto catastrófico inmediato en la producción.

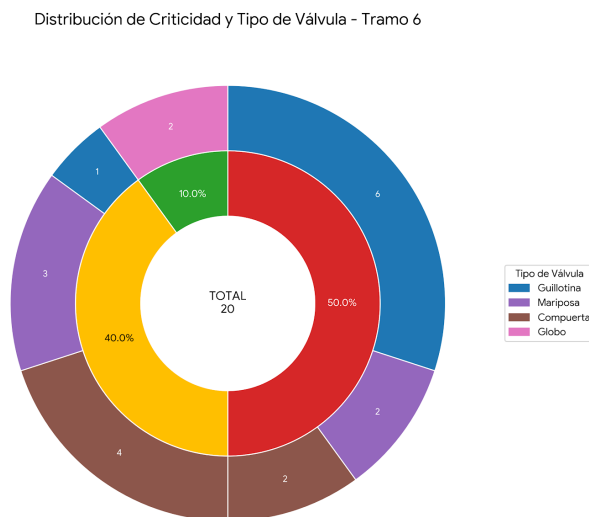


Figura A16: Distribución anidada de criticidad funcional (RCM) y tipología de válvulas en Tramo 6.

Finalmente, la Figura A16 muestra una distribución de criticidad de válvulas equitativa pero exigente:

- El 50 % de las válvulas (N=10) se clasifica como de criticidad Alta. Este grupo está compuesto mayoritariamente por válvulas de corte tipo **Guillotina** (60 % del segmento crítico), las cuales gobiernan el aislamiento de los ductos de alto riesgo mencionados anteriormente.
- La confiabilidad de estas válvulas de guillotina se vuelve, por tanto, el último bastión de seguridad. si un ducto falla (probabilidad alta), la válvula debe operar impecablemente para aislar la fuga.
- Se recomienda elevar la frecuencia de pruebas funcionales (Carrera Parcial) para este subgrupo específico de válvulas de guillotina en el Anillo B.

C. Definición de estrategias de mantenimiento específicas por tramo

TRAMO 3

Tabla 72: Tramo 3: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.

Línea	Ducto	Riesgo	MFR	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT01	12	Obstrucción severa por incrustación ($d > d_{crit}$)	Correctiva Programada	Limpieza Mecánica	ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
Anillo B	DT02	6	Reducción progresiva de área transversal	Predictivo (MBC)	Monitoreo Condición	Monitoreo de presión diferencial (ΔP) y medición de espesores (UT) semestral para proyección de tasa C_r .

Tabla 73: Tramo 3: Definición de estrategias de mantenimiento de válvulas.

Línea	Válvula	Riesgo	MFR	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	VV01	24	Atascamiento de la hoja por incrustación de fluido en guías.	Preventivo	MBT + Inspección	Ejecución de prueba de carrera parcial (Prueba de carrera 10-20%) para romper costra. Lubricación forzada de vástago y limpieza de solenoide.

TRAMO 5

Tabla 74: Tramo 5: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.

Línea	Ducto	Riesgo	MFR	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT01	12	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT02	12	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
Anillo B	DT03	5	Reducción progresiva de área por incrustación.	Predictiva (MBC)	Monitoreo Condición	Monitoreo mensual de ΔP y medición de espesores (UT) semestral para proyectar tasa C_r .
	DT04	5	Reducción progresiva de área por incrustación.	Predictiva (MBC)	Monitoreo Condición	Monitoreo mensual de ΔP y medición de espesores (UT) semestral para proyectar tasa C_r .

Tabla 75: Tramo 5: Definición de estrategias de mantenimiento de flujómetros.

Línea	Ducto	Inst.	Riesgo	MFR	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT01	FJ01	4	Desgaste normal / Sulfatación de terminales.	Preventiva	MBT (Rutina)	Inspección visual semestral de integridad física (pantalla, carcasa), limpieza externa y verificación de puesta a tierra.
	DT02	FJ02	4	Desgaste normal / Sulfatación.	Preventiva	MBT (Rutina)	Inspección visual semestral de integridad física, limpieza externa y verificación de puesta a tierra.
Anillo B	DT03	FJ03	4	Desgaste normal / Sulfatación.	Preventiva	MBT (Rutina)	Inspección visual semestral de integridad física, limpieza externa y verificación de puesta a tierra.
	DT04	FJ04	4	Desgaste normal / Sulfatación.	Preventiva	MBT (Rutina)	Inspección visual semestral de integridad física, limpieza externa y verificación de puesta a tierra.

Tabla 76: Tramo 5: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 1 de 2).

Línea	Ducto	Válvula	Criticidad	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT01	VV01 (Globo)	4	Fuga externa por desgaste de sellos.	Correctiva	A la falla	Inspección visual anual de integridad externa. Reemplazo solo ante falla.
		VV02 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV03 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV04 (Mariposa)	10	Desgaste de sello / Fuga interna.	Preventiva	Rutinaria	Ajuste de sellos (pernos retenedores) y verificación de movimiento suave.
	DT02	VV05 (Globo)	4	Fuga externa por desgaste de sellos.	Correctiva	A la falla	Inspección visual anual de integridad externa. Reemplazo solo ante falla.
		VV06 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV07 (Mariposa)	10	Desgaste de sello / Fuga interna.	Preventiva	Rutinaria	Ajuste de sellos (pernos retenedores) y verificación de movimiento suave.
		VV08 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100%) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.

Tabla 77: Tramo 5: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 2 de 2).

Línea	Ducto	Válvula	Criticidad	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo B	DT03	VV09 (Guillotina)	20	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV10 (Globo)	12	Desgaste de asiento / Fuga interna (Paso).	Predictiva	CBM	Monitoreo por ultrasonido aerotransportado y prueba de hermeticidad.
		VV11 (Guillotina)	20	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV12 (Guillotina)	20	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV13 (Mariposa)	30	Histéresis / Cavitación / Falla actuador.	Predictiva	CBM	Monitoreo analítico de vibraciones, discrepancia SetPoint vs Feedback y calibración.
		VV14 (Guillotina)	20	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
	DT04	VV15 (Guillotina)	20	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV16 (Guillotina)	20	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV17 (Mariposa)	30	Histéresis / Cavitación / Falla actuador.	Predictiva	CBM	Monitoreo analítico de vibraciones, discrepancia SetPoint vs Feedback y calibración.
		VV18 (Globo)	12	Desgaste de asiento / Fuga interna.	Predictiva	CBM	Monitoreo por ultrasonido aerotransportado y prueba de hermeticidad.
		VV19 (Guillotina)	20	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV20 (Compuerta)	18	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.

TRAMO 6

Tabla 78: Tramo 6: Definición de estrategias de mantenimiento de ductos.

Línea	Ducto	Riesgo	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo A	DT01	12	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT02	12	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT03	12	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
Anillo B	DT04	18	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.
	DT05	18	Obstrucción severa ($d > d_{crit}$).	Correctiva Programada	Hidrolimpieza (hidrojet)	Ejecución de hidrolimpieza (hidrojet) con tobera rotatoria para desincrustación y restitución de diámetro. Validación posterior con NDT.

Tabla 79: Tramo 6: Definición de estrategias de mantenimiento de flujómetros.

Línea	Ducto	Inst.	Riesgo	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo B	DT05	FJ01	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial de electrodos.	Predictiva	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat Technology para validación de circuitos y electrodos sin interrupción. Ajuste de parámetros EPD.
	DT04	FJ02	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat Technology y validación de cero. Comprobación de lazo 4-20mA.
Anillo A	DT01	FJ03	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat Technology para diagnóstico de recubrimiento en electrodos.
	DT03	FJ04	6	Desviación de lectura por aislamiento parcial.	Predictiva	Verificación Heartbeat	Ejecución de verificación Heartbeat Technology y ajuste de EPD ante posibles burbujas de aire.

Tabla 80: Tramo 6: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 1 de 2).

Línea	Ducto	Válvula	Criticidad	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo B	DT05	VV01 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV02 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV03 (Compuerta)	18	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
		VV04 (Mariposa)	30	Histéresis / Cavitación / Falla actuador.	Predictiva	CBM	Monitoreo analítico de vibraciones, curva de control y calibración de posicionador.
		VV05 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
Anillo A	DT03	VV06 (Globo)	4	Fuga externa por desgaste de sellos.	Correctiva	A la falla	Inspección visual anual de integridad externa. Reemplazo solo ante falla.
		VV07 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
		VV08 (Mariposa)	10	Desgaste de sello / Fuga interna.	Preventiva	Rutinaria	Ajuste de sellos (pernos retenedores) y verificación de movimiento suave.
		VV09 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.

Tabla 81: Tramo 6: Estrategias de mantenimiento de válvulas (Parte 2 de 2).

Línea	Ducto	Válvula	Criticidad	MFR (Modo de Falla)	EM	TM	Actividad de mantenimiento
Anillo B	DT04	VV10 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV11 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV12 (Mariposa)	30	Histéresis / Cavitación / Falla actuador.	Predictiva	CBM	Monitoreo analítico de vibraciones, curva de control y calibración de posicionador.
		VV13 (Guillotina)	24	Atascamiento crítico de hoja.	Preventiva	MBT	Prueba de carrera mensual (10-20 %), lubricación forzada y verificación de actuador.
		VV14 (Compuerta)	18	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
Anillo A	DT02	VV15 (Mariposa)	10	Desgaste de sello / Fuga interna.	Preventiva	Rutinaria	Ajuste de sellos (pernos retenedores) y verificación de movimiento suave.
	DT01	VV16 (Guillotina)	8	Atascamiento de hoja por incrustación.	Preventiva	MBT	Ciclado completo (100 %) en parada y ajuste controlado de prensaestopa.
		VV17 (Globo)	4	Fuga externa por desgaste de sellos.	Correctiva	A la falla	Inspección visual anual de integridad externa. Reemplazo solo ante falla.
		VV18 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.
		VV19 (Mariposa)	10	Desgaste de sello / Fuga interna.	Preventiva	Rutinaria	Ajuste de sellos (pernos retenedores) y verificación de movimiento suave.
		VV20 (Compuerta)	6	Traba mecánica por sedimentación.	Preventiva	MBT	Ciclado anual, limpieza de rosca e inspección de bonete.

D. Asignación de planes matrices específicos por tramos

TRAMO 3

Tabla 82: Tramo 3: Asignación de planes matrices de ductos.

Línea	Ducto	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
Anillo A	DT01	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
Anillo B	DT02	Predictivo (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)

Tabla 83: Tramo 3: Asignación de planes matrices de válvulas.

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
Anillo A	VV01 (Guillotina)	Preventivo	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)

TRAMO 5

Tabla 84: Tramo 5: Asignación de planes matrices de ductos.

Línea	Ducto	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
Anillo A	DT01	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
	DT02	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
Anillo B	DT03	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT04	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)

Tabla 85: Tramo 5: Asignación de planes matrices de flujómetros.

Ducto	Inst.	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT01	FJ01	Preventiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)
DT02	FJ02	Preventiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)
DT03	FJ03	Preventiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)
DT04	FJ04	Preventiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)

Tabla 86: Tramo 5: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 1 de 2).

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT01	VV01 (Globo)	Correctiva	STD-AP-VGL-CORR-MEC	Reparación de asientos (A la falla).	2	5.0	A la falla
	VV02 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV03 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV04 (Mariposa)	Preventiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Calibración y diagnóstico de actuador.	3	3.0	24 Sem (PPL)
DT02	VV05 (Globo)	Correctiva	STD-AP-VGL-CORR-MEC	Reparación de asientos (A la falla).	2	5.0	A la falla
	VV06 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV07 (Mariposa)	Preventiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Calibración y diagnóstico de actuador.	3	3.0	24 Sem (PPL)
	VV08 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)

Tabla 87: Tramo 5: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 2 de 2).

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT03	VV09 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV10 (Globo)	Preventiva	STD-AP-VGL-024S-MEC	Mantenimiento preventivo menor.	2	3.0	24 Sem (MRT)
	VV11 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV12 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV13 (Mariposa)	Predictiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Calibración y diagnóstico de actuador.	3	3.0	24 Sem (PPL)
	VV14 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
DT04	VV15 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV16 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV17 (Mariposa)	Predictiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Calibración y diagnóstico de actuador.	3	3.0	24 Sem (PPL)
	VV18 (Globo)	Preventiva	STD-AP-VGL-024S-MEC	Mantenimiento preventivo menor.	2	3.0	24 Sem (MRT)
	VV19 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV20 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado limpieza y engrase hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)

TRAMO 6

Tabla 88: Tramo 6: Asignación de planes matrices de ductos.

Línea	Ducto	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
Anillo A	DT01	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
	DT02	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
	DT03	Correctiva Programada	STD-AP-DUCT-024S-MEC	Limpieza hidrojet y cambio de sellos.	5	7.0	Incrustación > 50 [mm]
Anillo B	DT04	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)
	DT05	Predictiva (MBC)	STD-AP-DUCT-052S-NDT	Monitoreo espesores (Ultrasonido).	2	0.5	52 Sem (MRT)

Tabla 89: Tramo 6: Asignación de planes matrices de flujómetros.

Ducto	Inst.	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT05	FJ01	Predictiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)
DT04	FJ02	Predictiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)
DT01	FJ03	Predictiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)
DT03	FJ04	Predictiva	STD-AP-FIT-052S-INS	Contrastación y verificación de lazo.	2	2.0	52 Sem (MRT)

Tabla 90: Tramo 6: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 1 de 2).

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT05	VV01 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV02 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV03 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
	VV04 (Mariposa)	Predictiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Diagnóstico y calibración.	3	3.0	24 Sem (PPL)
	VV05 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
DT03	VV06 (Globo)	Correctiva	STD-AP-VGL-CORR-MEC	Reparación de asientos (A la falla).	2	5.0	A la falla
	VV07 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
	VV08 (Mariposa)	Preventiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Ajuste de sellos y verificación.	3	3.0	24 Sem (MRT)
	VV09 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)

Tabla 91: Tramo 6: Asignación de planes matrices de válvulas (Parte 2 de 2).

Ducto	Válvula	EM	Código SOMA	Descrip. breve	DOT	HH	FREC
DT04	VV10 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV11 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV12 (Mariposa)	Predictiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Diagnóstico y calibración.	3	3.0	24 Sem (PPL)
	VV13 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Prueba de carrera y lubricación.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV14 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
DT02	VV15 (Mariposa)	Preventiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Ajuste de sellos y verificación.	3	3.0	24 Sem (MRT)
DT01	VV16 (Guillotina)	Preventiva	STD-AP-VGU-012S-MEC	Ciclado completo en parada.	4	4.0	12 Sem (PPL)
	VV17 (Globo)	Correctiva	STD-AP-VGL-CORR-MEC	Reparación de asientos (A la falla).	2	5.0	A la falla
	VV18 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)
	VV19 (Mariposa)	Preventiva	STD-AP-VMA-024S-INS	Ajuste de sellos y verificación.	3	3.0	24 Sem (MRT)
	VV20 (Compuerta)	Preventiva	STD-AP-VCO-024S-MEC	Ciclado y limpieza de hilos.	3	2.0	24 Sem (MRT)

E. Memoria de Cálculo Detallada – Evaluación Económica

En el presente anexo se detalla el procedimiento matemático utilizado para evaluar la rentabilidad económica de la estrategia de mantenimiento propuesta, mediante los indicadores *Valor Actual Neto* (VAN), *Tasa Interna de Retorno* (TIR) y *Periodo de Recuperación* (Payback), utilizando como base el **Flujo de Caja Libre (FCL)** definido en la Fase IV.

E.1. Parámetros y estructura del modelo

Datos de entrada:

- Inversión inicial equivalente (I_0): **62,7 kUSD**
- Tasa de descuento (k): **10 % anual**
- Horizonte de evaluación (n): **5 años**
- Variación de capital de trabajo (ΔNWC): **57,7 kUSD**

Consideraciones clave del modelo:

- No existe CAPEX depreciable durante la fase evaluada, por lo que la depreciación es nula.
- El ΔNWC corresponde a stock crítico y kits de mantenimiento, tratados como capital de trabajo.
- El ΔNWC genera una **salida de caja en el año 0** y se **recupera íntegramente en el último año del horizonte**.
- En consecuencia, el FCL **no es constante** y debe evaluarse como una serie de flujos discretos.

Fórmula general de VAN (flujos no uniformes):

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{FCL_t}{(1+k)^t}$$

E.2. Escenario Pesimista (Eficacia baja: 0,5 horas/año)

Este escenario representa una reducción parcial del beneficio por riesgo, insuficiente para cubrir los costos del plan.

Flujos considerados:

- $FCL_{2027} = -62,7 \text{ kUSD}$

- $FCL_{2028-2031} = -23,9$ kUSD/año
- $FCL_{2032} = 33,8$ kUSD (incluye recuperación de ΔNWC)

Cálculo de VAN:

$$VAN_{\text{pesimista}} = -62,7 + \sum_{t=1}^4 \frac{-23,9}{(1,10)^t} + \frac{33,8}{(1,10)^5} \approx \mathbf{-118 \text{ kUSD}}$$

Payback: No definido (flujos acumulados negativos). **TIR:** No existe solución real positiva.

E.3. Escenario de Equilibrio (Eficacia mínima: 0,93 horas/año)

Este escenario corresponde al **punto de equilibrio económico**, donde la estrategia no crea ni destruye valor.

Flujos considerados:

- $FCL_{2027} = -62,7$ kUSD
- $FCL_{2028-2031} = 16,5$ kUSD/año
- $FCL_{2032} = 74,2$ kUSD

Cálculo de VAN:

$$VAN_{\text{equilibrio}} = -62,7 + \sum_{t=1}^4 \frac{16,5}{(1,10)^t} + \frac{74,2}{(1,10)^5} \approx \mathbf{0,0 \text{ kUSD}}$$

Payback simple:

$$Payback = \frac{62,7}{16,5} \approx \mathbf{3,8 \text{ años}}$$

TIR: $\approx 10\%$ (por definición del equilibrio).

E.4. Escenario Base (Eficacia esperada: 1,0 hora/año)

Corresponde al escenario realista, coherente con el historial operacional y conservador respecto de la ganancia de disponibilidad.

Flujos considerados:

- $FCL_{2027} = -62,7$ kUSD

- $FCL_{2028-2031} = 17,8 \text{ kUSD/año}$
- $FCL_{2032} = 75,5 \text{ kUSD}$

Cálculo de VAN:

$$VAN_{\text{base}} = -62,7 + \sum_{t=1}^4 \frac{17,8}{(1,10)^t} + \frac{75,5}{(1,10)^5} \approx \mathbf{40,8 \text{ kUSD}}$$

Periodo de recuperación simple:

$$Payback \approx \frac{62,7}{17,8} = \mathbf{3,5 \text{ años}}$$

TIR:

$$-62,7 + \sum_{t=1}^4 \frac{17,8}{(1+r)^t} + \frac{75,5}{(1+r)^5} = 0 \Rightarrow TIR \approx \mathbf{27 \%}$$

E.5. Escenario Optimista (Eficacia alta: 2,0 horas/año)

Representa una operación madura, con control efectivo de fallas críticas.

Flujos considerados:

- $FCL_{2027} = -62,7 \text{ kUSD}$
- $FCL_{2028-2031} = 101,2 \text{ kUSD/año}$
- $FCL_{2032} = 158,9 \text{ kUSD}$

Cálculo de VAN:

$$VAN_{\text{optimista}} = -62,7 + \sum_{t=1}^4 \frac{101,2}{(1,10)^t} + \frac{158,9}{(1,10)^5} \approx \mathbf{357 \text{ kUSD}}$$

Payback simple:

$$Payback \approx \frac{62,7}{101,2} = \mathbf{0,6 \text{ años}}$$

TIR: Superior al **100 %** (orden $>130 \%$).

La evaluación matemática confirma que, bajo un tratamiento contable de ΔNWC la estrategia de mantenimiento:

- No destruye valor a partir de una eficacia mínima de **0,93 h/año**.

- Genera un **VAN positivo de 40,8 kUSD** en el escenario base.
- Presenta alta robustez ante variaciones en la disponibilidad ganada.

Este análisis respalda técnicamente la implementación de la estrategia propuesta desde una perspectiva financiera, operacional y de riesgo.