



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**Modelo de gestión del mantenimiento de tuberías de proceso en concentradora
de cobre minera Candelaria**

POR

Matías Andrés Ávila Muñoz

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:

Dr. Emilio Enrique Dufeu Delarze
Dr. Cristian Alexis Canales Cárdenas

Ingeniero Supervisor:

Rodrigo Huenumán Rojas

Enero 2025

Concepción (Chile)

© 2025 Matías Andrés Ávila Muñoz

© 2025 Matías Andrés Ávila Muñoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Este logro no es solo el resultado de años de estudio, sino también de esfuerzo, perseverancia y la convicción de que, con dedicación, todo objetivo es alcanzable. Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a quienes han sido parte fundamental de este camino. A mis profesores, por compartir su conocimiento y ser una fuente constante de aprendizaje e inspiración. A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y por enseñarme que con determinación y trabajo duro se pueden superar cualquier desafío. A mi hermano, por su compañía y aliento en los momentos difíciles. A mis tutores y colegas de trabajo en Minera Candelaria, quienes con su orientación y experiencia me ayudaron a consolidar mis conocimientos y crecer profesionalmente.

A todos aquellos que emprenden su propio camino, quiero recordarles que la clave del éxito está en la perseverancia y la fe en uno mismo. Habrá obstáculos y momentos de duda, pero con determinación y la disposición de aprender en cada paso, los sueños pueden convertirse en realidad. Nunca dejen de esforzarse, de creer en sus capacidades y de dar lo mejor en cada desafío. Este logro es prueba de que el esfuerzo siempre vale la pena.

Resumen

El presente trabajo desarrolla un modelo de gestión del mantenimiento para las tuberías de proceso en la planta concentradora de cobre de Minera Candelaria, con el objetivo de mejorar la confiabilidad operativa y reducir costos asociados a fallas inesperadas. Para ello, se realizó un análisis detallado del proceso productivo de la planta, identificando las áreas críticas donde las fallas en las tuberías impactan la continuidad operativa. Se recopiló información técnica sobre los sistemas de tuberías, incluyendo materiales, configuración y condiciones de operación, además de analizar los registros históricos de fallas y los protocolos de mantenimiento existentes.

A partir de este diagnóstico, se evaluaron metodologías y normativas internacionales aplicables, como API 570, ASME B31.3 e ISO 55000, para estructurar un modelo de gestión eficiente. Se incorporaron técnicas avanzadas de monitoreo y diagnóstico de fallas, incluyendo ultrasonido, termografía y análisis de criticidad, permitiendo la detección temprana de defectos y optimización del mantenimiento. Además, se estableció un proceso sistemático para la selección de estrategias de mantenimiento, diferenciando entre mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, con énfasis en la implementación de estrategias basadas en la condición y en la evaluación de riesgo.

El modelo de gestión propuesto se estructuró en fases, que incluyen diagnóstico, identificación de sistemas de tuberías, análisis de riesgo y criticidad, planificación de estrategias de mantenimiento, ejecución, monitoreo de indicadores de desempeño y mejora continua. Como parte del estudio, se implementó el modelo en un área específica de la planta, lo que permitirá evaluar su impacto en la reducción de fallas y optimización de recursos.

Se concluye que la aplicación de un modelo estructurado de gestión del mantenimiento permitirá optimizar el desempeño de los sistemas de tuberías, mejorando la confiabilidad y eficiencia operativa. La implementación progresiva del modelo en toda la planta contribuirá a la sostenibilidad del proceso productivo, garantizando un uso eficiente de los recursos y una reducción de riesgos operacionales.

Abstract

This study develops a maintenance management model for process pipelines in the copper concentrator plant of Minera Candelaria, aiming to improve operational reliability and reduce costs associated with unexpected failures. To achieve this, a detailed analysis of the plant's production process was conducted, identifying critical areas where pipeline failures impact operational continuity. Technical information on pipeline systems was collected, including materials, configuration, and operating conditions, along with an analysis of historical failure records and existing maintenance protocols.

Based on this diagnosis, applicable international methodologies and standards, such as API 570, ASME B31.3, and ISO 55000, were evaluated to structure an efficient management model. Advanced monitoring and fault diagnosis techniques, including ultrasound, thermography, and criticality analysis, were incorporated to enable early defect detection and maintenance optimization. Additionally, a systematic process for selecting maintenance strategies was established, distinguishing between corrective, preventive, and predictive maintenance, with an emphasis on implementing condition-based and risk assessment strategies.

The proposed management model was structured in phases, including diagnosis, identification of pipeline systems, risk and criticality analysis, maintenance strategy planning, execution, performance indicator monitoring, and continuous improvement. As part of the study, the model was implemented in a specific area of the plant, allowing for the evaluation of its impact on failure reduction and resource optimization.

It is concluded that the application of a structured maintenance management model will optimize the performance of pipeline systems, enhancing reliability and operational efficiency. The progressive implementation of the model throughout the plant will contribute to the sustainability of the production process, ensuring efficient resource utilization and reducing operational risks.

Tabla de Contenidos

1	CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1	Contexto minera Candelaria	1
1.1.1	Proceso productivo.....	1
1.2	Planteamiento del problema	2
1.3	Objetivos generales y específicos.....	3
1.3.1	Objetivo general.....	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
1.4	Hipótesis o condiciones de diseño.....	3
1.5	Metodología de trabajo.....	3
2	CAPÍTULO 2: Marco teórico	4
2.1	El mantenimiento.....	4
2.1.1	Mantenimiento correctivo.....	4
2.1.2	Mantenimiento preventivo	4
2.1.3	Mantenimiento predictivo.....	4
2.2	Modelo de gestión de mantenimiento.....	5
2.2.1	Planificación y programación de mantenimiento	6
2.2.2	Orden de trabajo.....	7
2.2.3	Indicadores y análisis.....	7
3	CAPÍTULO 3: Estado del arte.....	8
3.1	Evolución del mantenimiento.....	8
3.2	Normativas y estándares internacionales.....	9
3.3	Casos de estudio y ejemplos de la industria	11
3.4	Métodos de monitoreo y detección de fallas	13
3.4.1	Inspección visual.....	13
3.4.2	Inspección televisiva.....	13
3.4.3	Tintas penetrantes	13
3.4.4	Termografía.....	14
3.4.5	Ultrasonido para medición de espesores y defectos	14
3.4.6	Método de memoria magnética del metal.....	15
3.4.7	Emisión acústica	15
4	CAPÍTULO 4: Tuberías de proceso planta concentradora de cobre CCMC	16

4.1	Área de molienda.....	16
4.2	Área de Pebbles – Fase III.....	17
4.3	Área de flotación	18
4.4	Área de espesador y filtro.....	18
4.5	Área de relave.....	19
5	CAPÍTULO 5: Modelo de gestión de mantenimiento de tuberías de proceso	20
5.1	Evaluar.....	21
5.2	Planificar.....	21
5.3	Implementar.....	21
5.4	Mejorar	21
6	CAPÍTULO 6: Metodología para implementar el modelo de gestión.....	21
6.1	Diagnóstico.....	22
6.2	Identificación de los sistemas de tuberías.....	22
6.3	Análisis de riesgo y criticidad.	23
6.3.1	Modos de falla.....	24
6.3.2	Causas y consecuencias	24
6.3.3	Jerarquización de activos	25
6.3.4	Resultados	26
6.3.5	Reevaluación del riesgo	27
6.4	Estrategia de mantenimiento.	28
6.4.1	Proceso de selección de estrategia de mantenimiento	28
6.4.2	Evaluación de factibilidad de estrategias	28
6.5	Planificación y programación.....	29
6.5.1	Planificación	30
6.5.2	Programación	30
6.5.3	Protocolo de manejo de imprevistos	30
6.6	Ejecución y respuesta	31
6.6.1	Proceso de inspección.....	31
6.6.2	Condiciones de repuesta	32
6.7	Indicadores de desempeño.....	33
6.7.1	Indicadores de confiabilidad.....	33
6.7.2	Indicadores de disponibilidad	34
6.7.3	Indicadores de eficiencia.....	34

6.8 Mejora continua.....	35
7 CAPÍTULO 7: Implementación del modelo de gestión de mantenimiento	36
7.1 Etapa 1: Diagnóstico.....	36
7.1.1 Objetivo.....	41
7.1.2 Responsabilidades.....	41
7.2 Etapa 2: Identificación de los sistemas de tuberías	41
7.3 Etapa 3: Análisis de riesgo y criticidad	42
7.3.1 Modos de falla, causas y efectos.....	43
7.3.2 Jerarquización de activos	44
7.4 Etapa 4: Estrategias de mantenimiento.....	45
7.4.1 Estrategia basada en análisis predictivo y monitoreo de condición:.....	45
7.4.2 Estrategia preventiva de cambio de elementos críticos y monitoreo de condición	47
7.5 Etapa 5: Planificación y programación.....	49
7.5.1 Planificación y programación de inspecciones	49
7.5.2 Planificación de cambio de activos.....	50
7.6 Etapa 6: Ejecución y respuesta	51
7.7 Etapa 7: Indicadores de desempeño.....	52
7.8 Etapa 8: Mejora continua.....	53
7.8.1 Sensor de desgaste de revestimiento interno	53
7.8.2 Método de memoria magnética LSM	54
7.8.3 Medición de campo de corriente alterna (ACFM).....	55
7.8.4 Método de ultrasonido de onda guiada	56
8 CAPÍTULO 8: Conclusiones y recomendaciones.....	56
8.1 Conclusión.....	56
8.2 Recomendaciones	57
9 BIBLIOGRAFÍA.....	57
Anexo A: Diagrama de proceso planta concentradora de cobre minera Candelaria	60
Anexo B: Elementos del sistema de tuberías del área de relave.....	61
Anexo C: Análisis de modo de falla y efectos	63
Anexo D: Diagrama de selección de estrategia de mantenimiento	64
Anexo E: Diagrama de selección de estrategia de mantenimiento.....	65
Anexo F: Mapas de calor de tuberías críticas según jerarquización.....	66
Anexo G: Actividades de mantenimiento sistemas de tuberías relave	67

Anexo H: Proceso de mejora continua	68
---	----

Lista de Figuras

Figura 1.1 Ubicación del complejo minera de cobre Candelaria [2].	1
Figura 2.1 Ejemplo de orden de trabajo [8].	7
Figura 2.2 Ejemplo de diagrama de Pareto [10]......	8
Figura 3.1 Modelo propuesto por Parra et al [17].	11
Figura 3.2 Ejemplo de inspección televisiva con robot.	13
Figura 3.3 Ejemplo de aplicación de tintas penetrantes.	14
Figura 3.4 Detección de puntos calientes codo.	14
Figura 3.5 Inspección espesores tubería de relave.	15
Figura 4.1 Área de molienda planta concentradora.....	16
Figura 4.2 Esquema sistema de impulsión molienda.	17
Figura 4.3 Esquema fase III.	17
Figura 4.4 Esquema sistema de impulsión fase III.....	17
Figura 4.5 Esquema área de flotación.	18
Figura 4.6 Esquema área de espesadores y filtro.	19
Figura 4.7 Esquema área de relave.....	20
Figura 5.1 Esquema modelo de gestión de mantenimiento tuberías de proceso.....	20
Figura 6.1 Metodología para implementar el modelo de gestión de mantenimiento.	22
Figura 7.1 Esquema de área 620.	37
Figura 7.2 Distribución de tuberías de succión área 620.	37
Figura 7.4 Distribución de trenes de bombas área 620.	38
Figura 7.5 Líneas de descarga de trenes de bombas.	38
Figura 7.6 Recorrido de líneas soterradas.	38
Figura 7.7 Distribución TSF 1.....	39
Figura 7.8 Distribución TSF 2.....	39
Figura 7.9 Elementos de tuberías	42
Figura 7.12 Pareto de fallas área de relave obtenido de RMES.....	42
Figura 7.13 Ejemplo de abrasión en la pared de la tubería [29]......	43
Figura 7.14 Tubería con alto grado de corrosión.	43
Figura 7.17 Distribución de la criticidad de los elementos de tuberías.....	44
Figura 7.21 Comparación del costo anual equivalente entre estrategias propuestas.	48
Figura 7.22 Sensor de desgaste de revestimiento interno.	54
Figura 7.23 Método de memoria magnética LSM.	54
Figura 7.24 Equipo de medición de ACFM [26].	55
Figura 7.25 Método de ultrasonido de onda guiada.	56

Lista de Tablas

Tabla 6.2 Criterios de riesgos de falla.....	25
Tabla 6.3 Criterios de probabilidad de falla.....	26
Tabla 6.4 Criticidad según rango obtenido.	26
Tabla 6.6 Tabla resumen para mostrar orden de prioridad	26
Tabla 7.2 Matriz de RACI para la aplicación del modelo de gestión.	41
Tabla 7.3 Estrategia y actividad implementada en tuberías de succión área 620.	45
Tabla 7.4 Estrategia y actividad implementada en tuberías entre bombas área 620.....	46
Tabla 7.5 Estrategia y actividad implementada en tuberías de descarga área 620.....	46
Tabla 7.6 Estrategia y actividad implementada en tuberías de descarga área 620.....	46
Tabla 7.7 Estrategia y actividad implementada en tuberías enlace hidráulico.....	47
Tabla 7.8 Costos asociados al monitoreo de condición.	47
Tabla 7.9 Costos asociados al cambio preventivo de elementos críticos.....	48
Tabla 7.10 Tiempos de entrega para activos.	51
Tabla 7.11 Indicadores obtenidos de RMES.....	53

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto minera Candelaria

La minería en Chile desempeña un papel crucial a nivel nacional, siendo uno de los pilares fundamentales de la economía. Contribuye significativamente al producto interno bruto del país y genera una considerable cantidad de empleo, tanto directo como indirecto. La exportación de minerales, en particular el cobre, es una de las principales fuentes de divisas, lo que fortalece la balanza comercial y apoya la estabilidad económica del país [1].

Ubicada en la región de Atacama, a una altitud de 650 metros sobre el nivel del mar y a 20 km al sur de la ciudad de Copiapó. Candelaria es una operación minera de cielo abierto y subterránea que proporciona mineral de cobre a una planta de procesamiento in situ con una capacidad de aproximadamente 75.000 toneladas por día [2].

A 100 kilómetros de la mina se encuentra el puerto Punta Padrones, en la ciudad de Caldera, puerto que pertenece a minera Candelaria y es el punto de embarque del concentrado de cobre. Ubicada en las instalaciones portuarias se encuentra una planta desalinizadora la cual es el suministro primario de agua de la planta concentradora contribuyendo el 100% del agua utilizada en la planta [2].



Figura 1.1 Ubicación del complejo minera de cobre Candelaria [2].

1.1.1 Proceso productivo

El mineral extraído de la mina es inicialmente descargado y triturado en el chancador primario de tipo giratorio 60x89 pulgadas, lo que reduce su tamaño a menos de 6 pulgadas. Este material triturado es luego transportado a través de una correa de 457 metros de largo hasta un centro de acopio con una capacidad de hasta 500.000 toneladas. Desde este punto, dos alimentadores, ubicados debajo del

acopio, distribuyen el mineral hacia las líneas 1 y 2, del área de molienda. El proceso en ambas líneas es idéntico [2].

Una vez el mineral llega a la línea 1 o 2, ingresa a un molino SAG de 36x15 pies, donde se reduce a un tamaño de partícula de menos de 3/8 de pulgada. El producto resultante de la molienda en el molino SAG es clasificado en harneros; el material que no alcanza el tamaño deseado es enviado a los chancadores de Pebbles para una nueva reducción de tamaño. Después de esta etapa, el mineral es clasificado nuevamente en harneros y posteriormente triturado en un molino de barras de 14x22 pies. Esta pulpa es finalmente enviada a las líneas 1 y 2 para ser tratada junto con el resto del material [2].

El mineral de menor tamaño que se obtiene en las líneas 1 y 2 es procesado en dos molinos de bolas 20x30 pies. La pulpa resultante es enviada al área de flotación, que cuenta con circuitos de celdas Rougher y Scavenger, operando de forma independiente en cada línea. El concentrado de cobre producido en ambas líneas se dirige a tres espesadores de 100 pies de diámetro y, finalmente, a la planta de filtros, donde se seca mediante 8 secadores de filtro cerámico, reduciendo la humedad al 9%. El concentrado seco es transportado por una cinta hasta una estación de almacenamiento, y luego es trasladado a Punta Padrones, donde se embarca hacia su destino final [2].

El diagrama de todo el proceso productivo se encuentra en el anexo A

1.2 Planteamiento del problema

La disponibilidad se define como la probabilidad de que un componente se encuentre en su estado operativo normal en un momento dado. Considerar este aspecto es crucial, ya que permite evaluar el rendimiento y la fiabilidad de los componentes a lo largo del tiempo [3].

En particular, la disponibilidad operativa de la planta concentradora es sumamente importante para cumplir con las metas de producción y lograr el mayor beneficio económico para la compañía. En este sentido, asegurar la máxima disponibilidad de los procesos es el principal objetivo del área de mantención de proceso.

Una gestión eficiente del mantenimiento también es crucial para minimizar impactos sociales y ambientales, Especialmente ante fallas en equipos críticos, puede provocar paradas no planificadas que aumentan costos operativos, generan derrames, emisiones contaminantes o residuos peligrosos que dañen el entorno. Estas situaciones también afectan a las comunidades locales, exponiéndolas a riesgos y deteriorando su calidad de vida, lo que puede derivar en conflictos sociales y sanciones regulatorias [4].

Dado lo anterior, es importante destacar que las líneas de ductos y tuberías son un sistema transversal en todas las áreas de la planta. El mantenimiento de estos elementos a menudo provoca detenciones parciales o generales en las áreas de trabajo, especialmente si no se implementa un plan de mantenimiento adecuado que garantice una operación continua con tiempos de parada mínimos.

Implementar estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo es clave para evitar fallos inesperados y optimizar el ciclo de vida de los equipos. El mantenimiento predictivo, basado en la

condición real de los componentes, permite identificar problemas antes de que se conviertan en fallos graves, lo que reduce tanto el tiempo de inactividad como los costos asociados [5].

1.3 Objetivos generales y específicos

1.3.1 Objetivo general

Crear un modelo de gestión de mantenimiento para las tuberías de proceso de la planta concentradora, con el fin de garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas, optimizar la planificación de recursos y contribuir al incremento de la productividad global.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Levantar información sobre tuberías de procesos para la generación de concentrado de cobre.
2. Identificar posibles fallas que provocan las mayores detenciones, estudiar las causas y efectos.
3. Estudiar herramientas y modelos de predicción aplicados a tuberías. Además, investigar sobre tecnologías actuales de predicción.
4. Levantar información sobre planes actuales de mantención, protocolos de inspección y el historial de mantenimiento.
5. Estructurar un modelo de gestión para asegurar condiciones de las tuberías.
6. Implementar el modelo de gestión en un área de la planta concentradora.

1.4 Hipótesis o condiciones de diseño

La implementación de un modelo gestión de mantenimiento de tuberías de la planta concentradora mejora la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas. Además, fomenta la planificación estratégica de recursos generado un impacto positivo en la productividad global.

1.5 Metodología de trabajo

El proceso inicia con la recopilación de información técnica clave, incluyendo planos, especificaciones y registros históricos de las tuberías de proceso. Esto se complementa con entrevistas al personal de mantenimiento y visitas a terreno para validar y ampliar la información. Luego, se analizan los registros de fallas y reportes de mantenimiento para identificar patrones recurrentes y sus impactos, aplicando técnicas de análisis de causa raíz.

Paralelamente, se revisa la literatura para encontrar modelos de predicción de fallas y tecnologías de monitoreo avanzadas que puedan integrarse. Se examinan los planes de mantenimiento actuales, identificando oportunidades de mejora y posibles brechas. Posteriormente, se selecciona un área específica de la planta para un análisis de criticidad, priorizando los modos de falla según su impacto en la operación y proponiendo estrategias de mitigación.

Con toda la información, se diseña un modelo de gestión integral que combina mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, incorporando herramientas de monitoreo en tiempo real. Este modelo es validado con el equipo técnico y documentado en un manual con procedimientos y responsabilidades claras. Finalmente, se implementa en un área piloto de la planta concentradora, capacitando al personal y monitoreando resultados para ajustar y optimizar su aplicación en el resto de la planta.

CAPÍTULO 2: Marco teórico

2.1 El mantenimiento

El mantenimiento tiene como objetivo incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción al realizar actividades como la planeación, organización, control y ejecución de los métodos de conservación de los activos físicos. En este sentido busca prevenir eventos indeseables, reparar mecanismos en falla y asegurar la disponibilidad apropiada [6].

Un buen sistema de mantenimiento es aquel que permite optimizar la relación costo-beneficio, que existe entre la mantención y la producción. Un alto costo de mantenimiento no garantiza un rendimiento óptimo de la industria, las fallas pueden ser ocasionadas por eventos de carácter operativo o de administración. Por esta razón existen 3 enfoques de mantenimiento [6].

2.1.1 Mantenimiento correctivo

Este tipo de mantenimiento se basa en corregir la falla de un equipo que demuestre la necesidad de reparación o reemplazo. Las piezas y equipos se llevan al límite de su vida útil, es decir hasta la falla, por lo tanto, es necesario reemplazar el componente para que vuelva a su función inicial [6].

El mantenimiento correctivo genera un impacto financiero considerable en las empresas, principalmente debido a las paradas no programadas. Esto se debe a la falta de un seguimiento continuo del estado de los equipos, lo que puede derivar en fallas catastróficas y largos períodos de indisponibilidad. A esto se suma la posible falta de repuestos disponibles y la escasez de personal capacitado para realizar las reparaciones de manera oportuna [7].

2.1.2 Mantenimiento preventivo

Este tipo de mantenimiento se basa en una serie de actividades planificadas que se ejecutan en intervalos definidos, con el propósito de asegurar que los activos cumplan con sus funciones dentro del entorno operativo, optimizando la eficiencia de los procesos. Su objetivo es prevenir y anticiparse a posibles fallas en elementos, componentes, máquinas o equipos. Además, abarca diversas acciones como reemplazos, adaptaciones, restauraciones, inspecciones y evaluaciones, las cuales se realizan de acuerdo con un calendario o en función del uso de los equipos [7].

La implementación de un programa de mantenimiento preventivo cuenta con las siguientes fases:

- **Planificación:** Se especifica las actividades por desarrollar, con qué personal se va a trabajar, equipos y herramientas por utilizar, tiempo aproximado de trabajo.
- **Programación:** Se define el día, la hora, lugar dónde se van a desarrollar, las actividades previamente planificadas.
- **Ejecución:** Realización de los trabajos, previamente definidos.
- **Control:** Verificación y validación de los trabajos ejecutados.

2.1.3 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se basa en la correlación de parámetros físicos con el estado o desgaste de una máquina. Este enfoque utiliza la medición, seguimiento y monitoreo continuo de variables operativas clave del equipo. A través de este proceso, se establecen valores de alarma y acción para las variables consideradas críticas, permitiendo anticipar fallas y realizar intervenciones antes de que

se produzcan averías significativas. De este modo, se optimiza el rendimiento del equipo y se reducen los tiempos de inactividad no planificados [7].

Este tipo de mantenimiento emplea una variedad de técnicas no destructivas esenciales para monitorear la condición de los equipos sin interrumpir su operación ni comprometer la integridad de sus componentes. Estas técnicas permiten identificar de manera temprana signos de desgaste, deformaciones, fisuras u otros problemas que podrían evolucionar hacia fallas críticas. Entre las más utilizadas destacan el análisis de vibraciones, la termografía, el ultrasonido y el análisis de aceite [7].

2.2 Modelo de gestión de mantenimiento

Un modelo de gestión de mantenimiento es un marco estructurado de principios, procesos y herramientas que permite planificar, ejecutar y controlar de forma sistemática las actividades de mantenimiento en una organización. Por su parte, la gestión de mantenimiento abarca todas las acciones técnicas y administrativas necesarias para mantener los activos en condiciones óptimas de operación. En este contexto, el modelo de gestión de mantenimiento proporciona la base metodológica y operativa para llevar a cabo esas acciones de manera eficiente y alineada con los objetivos estratégicos de la organización [9].

La gestión de mantenimiento se refiere a la planificación, organización, control y ejecución de todas las actividades necesarias para asegurar que los equipos y sistemas de una empresa funcionen de manera eficiente y continua. Implica el uso de recursos, humanos y materiales para mantener en óptimas condiciones los activos, como maquinaria y equipos, lo que es crucial para cualquier empresa industrial [7].

Una buena gestión de mantenimiento debe estar alineada con los siguientes puntos:

- 1. Optimización de la disponibilidad de los equipos productivos:** El mantenimiento tiene como objetivo reducir el tiempo de inactividad de los equipos. Cuanto más disponible esté el equipo, mayor será la productividad de la empresa.
- 2. Reducción de costos de mantenimiento:** Se busca realizar un mantenimiento eficiente y preventivo para evitar reparaciones costosas o reemplazos inesperados, lo que ahorra recursos financieros.
- 3. Optimización de los recursos humanos:** La correcta gestión del personal de mantenimiento es crucial. Implica la asignación adecuada de técnicos y operarios, capacitación continua y optimización de sus habilidades.
- 4. Maximización de la vida útil de la maquinaria:** Un buen programa de mantenimiento extiende la vida útil de los equipos, lo que reduce la necesidad de inversiones en nuevos activos.

La gestión de mantenimiento no solo se apoya en principios y objetivos estratégicos, sino que también se fundamenta en herramientas y procesos específicos que permiten operativizar sus acciones. Entre estos elementos destacan la planificación y programación, que estructuran las actividades de mantenimiento para garantizar su eficiencia y minimizar interrupciones. Además, el modelo incluye

herramientas clave, como las órdenes de trabajo y los indicadores de gestión, que aseguran un monitoreo continuo y permiten ajustes oportunos.

En este marco, la aplicación de metodologías de análisis y el uso de tecnologías avanzadas son esenciales para implementar un mantenimiento predictivo y eficiente. Estos aspectos, que se desarrollan a continuación, conforman el núcleo operativo del modelo de gestión y son fundamentales para alinear las actividades de mantenimiento con los objetivos de confiabilidad, disponibilidad y optimización de recursos.

2.2.1 Planificación y programación de mantenimiento

La planificación es el proceso mediante el cual se organizan y estructuran las actividades necesarias para llevar a cabo el mantenimiento de los equipos y máquinas de una empresa. Implica definir de manera clara y precisa cómo, cuándo y qué tipo de mantenimiento se realizará, con el objetivo de asegurar un funcionamiento eficiente de los equipos y minimizar interrupciones operativas [7].

Este proceso permite a las empresas anticipar necesidades de mantenimiento, reducir tiempos de inactividad, y coordinar eficazmente los recursos, tales como personal, herramientas y repuestos. Además, garantiza que todas las áreas involucradas estén alineadas y comprometidas con los objetivos organizacionales [7].

Pasos para una planeación eficaz:

- Definir claramente el alcance del trabajo y los recursos necesarios.
- Coordinar transporte, repuestos y la seguridad industrial.
- Priorizar las tareas considerando impacto y urgencia.
- Asegurarse de cumplir con regulaciones ambientales y de seguridad.

La programación es el proceso de organizar las actividades planificadas en un orden secuencial y dentro de plazos específicos, asegurando la correcta ejecución de los trabajos. Implica estructurar las tareas de mantenimiento según una secuencia lógica, considerando su urgencia, la disponibilidad de recursos (equipo, personal, herramientas) y el tiempo disponible [7].

Este enfoque garantiza que las labores de mantenimiento se realicen en el momento adecuado, sin interferir con la operación productiva de la empresa. Además, es esencial para coordinar el uso eficiente de los recursos disponibles, como maquinaria, repuestos y personal [7].

La programación también incluye la definición de prioridades basadas en la urgencia y criticidad de cada tarea, la coordinación con otras áreas de la empresa, y la capacidad de adaptarse a cambios inesperados. Asimismo, debe considerar la periodicidad de los trabajos de mantenimiento (diaria, semanal, mensual, etc.), basándose en inspecciones y necesidades operativas [7].

Elementos de una programación óptima:

- Órdenes de trabajo claras y priorizadas.
- Disponibilidad de personal capacitado y herramientas adecuadas.
- Coordinación con producción para no afectar la operación diaria.

- Monitoreo y registro de trabajos realizados para mejorar futuras programaciones.

2.2.2 Orden de trabajo

Una orden de trabajo es un documento fundamental en la gestión de mantenimiento, empleado para rastrear problemas, gestionar trabajos, proyectos y programar el mantenimiento de equipos. En él se registra información clave, como el tipo de mantenimiento realizado, las actividades ejecutadas, los costos, tiempos, fallas detectadas, así como los recursos humanos y materiales empleados [7].

La OT (orden de trabajo) permite determinar los recursos necesarios y generar un historial que facilita la gestión eficiente del mantenimiento, ayudando a identificar y controlar posibles desviaciones. Aunque cada empresa adapta sus OT a sus particularidades organizacionales, existen ciertos campos que son universales, tales como: número consecutivo, categoría de la tarea, prioridad, historial del equipo, tiempo de inactividad y duración real del trabajo [7].

Figura 2.1 Ejemplo de orden de trabajo [8].

2.2.3 Indicadores y análisis

Los indicadores de gestión son herramientas fundamentales para evaluar el rendimiento de los procesos, ya que permiten identificar desviaciones respecto a las metas establecidas y realizar los ajustes necesarios para optimizar el desempeño. Además, ayudan a mantener los aspectos positivos dentro de los valores ideales, asegurando que las operaciones se mantengan alineadas con los objetivos estratégicos de la empresa [7].

Estos indicadores son esenciales para garantizar un ciclo de mejora continua, ya que proporcionan datos clave que facilitan la toma de decisiones informada. Para maximizar su efectividad, es importante que se midan y analicen de forma regular, con la frecuencia adecuada (semanal, mensual, trimestral, etc.), lo que permite detectar y corregir problemas a tiempo, asegurando una gestión eficiente y proactiva del mantenimiento [7].

Para analizar la productividad y la calidad de la gestión actualmente se utiliza un gran número de útiles, las herramientas básicas de gestión son procedimientos aplicados al estudio y resolución de

problemas relacionados con la producción o la gestión de calidad que se caracterizan por su simplicidad, facilidad de uso e interpretación [9]. Algunas de estas herramientas son:

El diagrama de Pareto, método gráfico de análisis que permite ver de forma cualitativa y cuantitativa los factores que intervienen en un problema, puestos en orden decreciente. Una de las principales aplicaciones de este diagrama es la capacidad que tienen para mostrar las causas que inciden en un problema e indicar por qué causas es recomendable empezar a solucionar. Al mismo tiempo cuantifica los progresos que se realizan en la solución de dicha causa [9].



Figura 2.2 Ejemplo de diagrama de Pareto [10].

CAPÍTULO 3: Estado del arte

3.1 Evolución del mantenimiento

El mantenimiento ha pasado por diferentes enfoques que buscan equilibrar la reducción de paradas imprevistas y el uso eficiente de los recursos. Inicialmente, se aplicaba el mantenimiento correctivo, consisten en reparar los equipos o componentes solo cuando ocurría la falla, lo que generaba altas pérdidas productivas y sobrecostos por detenciones no planificadas. En Respuesta a estas limitaciones, surgió el mantenimiento preventivo, mediante el cual se programan intervenciones a intervalos regulares, reduciendo la frecuencia de fallas imprevistas, pero a menudo implicando reemplazos o inspecciones que pueden ser innecesarias si el equipo aún se encuentra en buenas condiciones [5].

Posteriormente, con el avance de la instrumentación y el análisis de datos, tomó relevancia el mantenimiento predictivo o basado en condición, que aprovecha mediciones para determinar el estado real de los activos y planificar intervenciones solo cuando los indicadores sugieren un deterioro significativo. Este enfoque permite un uso más eficiente de los recursos y reduce tanto las detenciones no programadas como las intervenciones prematuras. Por último, se estableció el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), cuyo principio consiste en identificar y analizar los modos de falla, evaluando sus consecuencias sobre la seguridad, la producción y entorno, para diseñar planes de mantenimiento que prioricen la confiabilidad y disponibilidad de los activos más críticos [5].

En la industria minera, especialmente en el mantenimiento de tuberías, la adopción de técnicas basadas en condición y la aplicación de metodologías como RCM ayudan a detectar de forma temprana problemas como corrosión, fugas u otras, minimizando así el impacto en la productividad y

asegurando la continuidad operativa. De esta manera, el mantenimiento deja de ser una tarea netamente reactiva para transformarse en una actividad estratégica que contribuye directamente a la operación minera [11].

3.2 Normativas y estándares internacionales

La gestión de mantenimiento de tuberías en sistemas industriales se ha visto influenciada y estandarizada gracias a la adopción de normativas internacionales, entre las cuales destacan las elaboradas por el American Petroleum Institute (API) y la American Society of Mechanical Engineers (ASME). Estas guías técnicas y procedimentales establecen mejores prácticas para la integridad, seguridad y operación eficiente de tuberías, aspectos que resultan críticos en la industria minera, así como en los sectores de petróleo y gas [12] [13].

En el ámbito de la gestión de activos y, particularmente, del mantenimiento de tuberías, estas normativas pueden complementarse con los lineamientos de la ISO 55.000 e ISO 55.001, que proveen un enfoque estratégico y sistémico para optimizar el ciclo de vida de los activos. De esta forma, mientras que API y ASME especifican procedimientos y requisitos técnicos para el diseño, la inspección y la evaluación de integridad, la serie ISO 55.000 se centra en la planificación, la gestión de riesgos y la alineación de la gestión de activos con la estrategia organizacional [14] [15].

La norma ISO 55000 establece los conceptos básicos y principios fundamentales de la gestión de activos, destacando la importancia de abordar el ciclo de vida completo de cada activo, desde su adquisición hasta el retiro o reemplazo. Este enfoque permite alinear las decisiones relacionadas con los activos a la estrategia de la organización, priorizando aquellos que son críticos para la operación o generan mayor impacto en la productividad y la seguridad [14].

La norma ISO 55001 traduce los principios en requisitos específicos para el diseño, implementación y la mejora de un sistema de gestión de activos. Destacando los siguientes aspectos:

- **Gestión basada en Riesgo:** La norma impulsa la identificación y evaluación de riesgos como elemento clave para priorizar acciones y optimizar el uso de recursos. Aplicado a tuberías de proceso, esto se traduce en focalizar las intervenciones de mantenimiento (correctivas, preventivas o predictivas) en las áreas con mayor probabilidad de falla o mayor impacto en la producción [17].
- **Ciclo de Vida y Mejora Continua:** ISO 55.001 promueve el uso del ciclo PDCA (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar) para garantizar un monitoreo constante del desempeño de los activos. En el caso de las tuberías, se evalúan indicadores de fallas, costos, tiempos de inactividad y otros parámetros que permitan ajustar los planes de mantenimiento y perfeccionar la estrategia de gestión [17].
- **Enfoque Integrado de Información:** Se enfatiza la necesidad de sistemas de información robustos que respalden la toma de decisiones. Para la industria minera, esto puede significar la implementación de software de gestión de mantenimiento que integre datos de inspecciones, análisis de criticidad y pronósticos de desgaste [17].

La norma API 570 se enfoca en la inspección y reparación de sistemas de tuberías en servicio. Establece directrices para la evaluación de los daños, planificación de inspecciones basadas en el riesgo y los métodos de reparación y alteración que aseguren la integridad de las tuberías durante su operación [12]. Entre los aspectos más relevantes de esta normativa se encuentran:

- **Identificación de mecanismos de daño:** Los mecanismos de daño más comunes incluyen la corrosión interna y externa, el agrietamiento por corrosión bajo tensión y el desgaste erosivo. Un conocimiento profundo de estos mecanismos permite seleccionar métodos de inspección adecuados, como la inspección visual, ultrasonidos, partículas magnéticas y otros métodos de evaluación no destructivos [12].
- **Planificación de la inspección:** La planificación de las inspecciones se basa en un enfoque basada en el riesgo, donde se evalúan tanto la probabilidad como las consecuencias de fallas en las tuberías. Este enfoque permite priorizar las inspecciones en puntos críticos y establecer los intervalos de tiempo óptimos para las revisiones. El RBI ayuda reducir costos, ya que se enfocan en las áreas con mayor criticidad [12].
- **Procedimientos de reparación y alteración:** La normativa establece procedimientos específicos para la reparación y alteración de tuberías, asegurando que los métodos utilizados cumplan con los requisitos de integridad [12].

El código ASME 31.3 es un estándar esencial para el diseño y la construcción de sistemas de tuberías de proceso que operan a alta presión y temperatura. Este código cubre una amplia gama de materiales, condiciones de diseño y métodos de construcción [13]. Los aspectos más relevantes son:

- **Criterios de diseño:** Los criterios de diseño especifican las condiciones bajo las cuales deben operara las tuberías, considerando factores como la presión interna, la resistencia a la tracción del material, la temperatura de operación y efectos del flujo de fluidos [13].
- **Requisitos de fabricación e instalación:** Establece que las tuberías deben ser fabricadas de acuerdo con métodos que aseguren la calidad del material y la integridad de las uniones soldadas. Además, define los procedimientos para el curvado de tuberías, tratamiento térmico, soldadura y uniones de componentes [13].
- **Inspección, pruebas y registros:** se requiere que se realicen inspecciones en varias etapas del ciclo de vida de las tuberías, incluyendo pruebas hidrostáticas y neumáticas para verificar la integridad de las uniones y la resistencia del material bajo presión. Los registros de todas las inspecciones y pruebas deben mantenerse y estar disponibles para revisiones futuras [13].

El código ASME B31G se centra en la evaluación de defectos en tuberías metálicas en servicio proporcionando métodos y procedimientos para calcular la capacidad restante de las tuberías que han sufrido pérdida de espesor debido a la corrosión o daños mecánicos [16]. Los puntos más importantes incluyen:

- **Evaluación de defectos de corrosión:** La norma ofrece procedimientos para evaluar diferentes tipos de defectos, como abolladuras, ranuras y pérdidas de material por corrosión. Se define un criterio que permite clasificar los defectos en tres categorías: aceptable, crítico o

rechazado. La clasificación se basa en la relación entre la profundidad del defecto y el espesor de la pared de la tubería, así como en la extensión longitudinal del daño [16].

- **Reparación de defectos:** Si un defecto se clasifica como crítico, el código establece varias opciones de reparación. Las reparaciones pueden incluir la instalación de refuerzos, mangas de reparación, parches o incluso la reducción de la presión operativa para disminuir el esfuerzo en la zona dañada. El ASME B31G también describe los pasos necesarios para realizar reparaciones de soldadura de manera segura y efectiva [16].

En el contexto de la industria minera, donde las condiciones de operación de las tuberías suelen ser severas debido a la abrasión y la presencia de agentes corrosivos, la aplicación de estas normativas es fundamental para garantizar la continuidad operacional. La combinación de las metodologías de inspección basadas en el riesgo del API 570, los criterios de diseño del ASME B31.3 y la evaluación de defectos del ASME B31G permite establecer un plan de gestión de mantenimiento integral que mitigue los riesgos de falla y reduzca los costos asociados con paradas no programadas.

3.3 Casos de estudio y ejemplos de la industria

Parra et al. [17] implementaron en una mina hierro en Colima, México, como parte de un proyecto de gestión de activos y alineados con la norma ISO 55.001, un modelo de gestión de mantenimiento que busca optimizar el desempeño técnico y económico de los activos durante su ciclo de vida, asegurando confiabilidad y mejora continua.

El modelo lo estructuró en ocho fases principales, desarrolladas de manera secuencial y en bucle cerrado para garantizar la mejora continua.



Figura 3.1 Modelo propuesto por Parra et al [17].

La implementación del modelo de gestión de mantenimiento logró los siguientes resultados en su operación:

- Tiempo medio entre fallas incrementado de 210 a 260 horas.
- Reducción de la frecuencia de fallas de 44 a 33 fallas por año.
- Disponibilidad operacional aumentada del 92.9% al 95.5%.
- Costos de oportunidad disminuidos en 2.46 millones de dólares anuales.

En base a los resultados el modelo implementado demostró ser robusto y efectivo para gestionar activos críticos en entornos mineros. Su éxito radica en la capacidad de estructurar procesos, priorizar recursos y fomentar la mejora continua [17].

Acuña et al. [19] desarrolló un plan de mantenimiento predictivo basado en la recopilación y análisis de datos para la gestión de una tubería de descarga de concentrado de cobre de 22 pulgadas de diámetro. Su análisis se fundamentó en las inspecciones de espesores realizadas mediante la técnica de ultrasonido, lo que permitió caracterizar los modos de falla, identificar las secciones críticas y registrar el tiempo transcurrido entre cada fallo. Posteriormente, organizó estos tiempos de falla junto con los datos de la vida útil recomendada por el fabricante para realizar un análisis de Weibull, que se utilizó para evaluar la confiabilidad de las tuberías. Esto permitió determinar la probabilidad de que las tuberías continúen operando de manera efectiva durante un periodo específico sin presentar fallas críticas.

Con base en los resultados del análisis, se determinó que el tiempo óptimo de reemplazo es de 18.000 horas. Asimismo, se establecieron puntos de medición de espesores en áreas críticas con una frecuencia de inspección cada 5.000 horas durante las primeras 15.000 horas de operación, y posteriormente cada 1.000 horas hasta alcanzar las 18.000 horas, momento en el cual se recomienda realizar un reemplazo preventivo de las tuberías [19].

Xie et al. [20] proponen una metodología para la reevaluación de tuberías basada en riesgos con el objetivo de determinar los intervalos de reevaluación para tuberías expuestas a condiciones de corrosión. Esta metodología se fundamenta en la probabilidad de falla (PoF) como la variable principal de decisión, integrando factores de riesgo y costos asociados al ciclo de vida de las tuberías.

El modelo propuesto se basa en la predicción de la evolución de los defectos causados por la corrosión en términos de la geometría del daño, desarrollando ecuaciones que permiten evaluar si el defecto ha alcanzado un punto crítico de falla. Se definen dos estados límite para determinar la falla [20]:

- 1. Condición de presión de ruptura:** Se establece que, si la presión operativa de la tubería supera la presión de ruptura, la tubería se considera en condición de falla.
- 2. Profundidad máxima del defecto:** Se determina que, si la profundidad del defecto excede el 80% del espesor de la pared de la tubería, ésta se clasifica como fallida.

A partir de estos criterios, se evalúa la probabilidad de falla del sistema, incorporando también las incertidumbres en el crecimiento de los defectos, las cuales son modeladas mediante distribuciones normales. Finalmente, este modelo se emplea para evaluar la condición de la tubería en distintos puntos de tiempo, determinando así los intervalos de reevaluación basados en la PoF. Esto permite la toma de decisiones fundamentadas en riesgos para la planificación de mantenimiento y la reparación de las tuberías, optimizando los recursos y garantizando la integridad estructural del sistema [20].

3.4 Métodos de monitoreo y detección de fallas

Las inspecciones son fundamentales para asegurar la integridad mecánica de las tuberías en operación, ya que previenen fallas que podrían causar fugas, accidentes o interrupciones en el proceso. Su enfoque principal es la detección temprana de problemas como la corrosión, el desgaste o defectos estructurales, lo que permite realizar reparaciones oportunas antes de que se produzcan fallos catastróficos [5].

En la minería y otras industrias, se han implementado diversos métodos de inspección que permiten la detección temprana de fallas como corrosión, grietas, desgaste y vibraciones anómalas. A continuación, se describen los principales enfoques utilizados para este propósito.

3.4.1 Inspección visual

La inspección visual puede realizarse de externamente para identificar problemas que puedan comprometer la integridad del ducto, así como el estado del recubrimiento, las uniones y las estructuras de soporte [12].

Por otro lado, la inspección interna se lleva a cabo únicamente durante paradas planificadas o actividades de mantenimiento que requieran la desconexión de los ductos. Este tipo de inspección permite detectar depósitos, corrosión interna u obstrucciones. Además, es fundamental revisar elementos como pernos, uniones, bridas y empaquetaduras en busca de deterioro para asegurar un funcionamiento óptimo [12].

3.4.2 Inspección televisiva

La inspección televisiva, es una técnica avanzada que complementa la inspección visual tradicional de tuberías. Este método emplea robots equipados con cámaras de alta resolución que se introducen en el interior de las tuberías, permitiendo una evaluación detallada. Estos robots son capaces de detectar de manera temprana problemas como corrosión, grietas, obstrucciones y desgaste en las tuberías. Además, su diseño les permite acceder a áreas de difícil alcance, proporcionando una visión integral del estado interno [21].



Figura 3.2 Ejemplo de inspección televisiva con robot.

3.4.3 Tintas penetrantes

Consiste en aplicar un tinte coloreado sobre una superficie del componente a inspeccionar. Tras un tiempo de penetración, se elimina el exceso de tinte y se aplica un revelador, que actúa como absorbente, ayudando a extraer el tinte de las fallas. Los defectos se detectan bajo luz ultravioleta o blanca, según el tipo de tinte utilizado [22].

Es una técnica sencilla y económica para detectar defectos superficiales en casi todo tipo de materiales, excepto los porosos. Aunque es rápida y capaz de identificar pequeñas grietas, su limitación principal es que solo detecta fallas abiertas en la superficie [22].



Figura 3.3 Ejemplo de aplicación de tintas penetrantes.

3.4.4 Termografía

La inspección termográfica utiliza cámaras infrarrojas para detectar la radiación térmica emitida por los objetos, lo que permite visualizar áreas con diferencias de temperatura que pueden indicar problemas subyacentes. En los sistemas de tuberías, esta técnica facilita la detección de fugas y proporciona una herramienta eficaz para analizar el estado de la pared de la tubería, al identificar puntos calientes que pueden señalar un adelgazamiento del espesor del ducto. Además, la termografía se utiliza para evaluar el estado de válvulas, bombas y otros equipos que manejan fluidos, detectando posibles fallos operacionales de forma temprana [12].

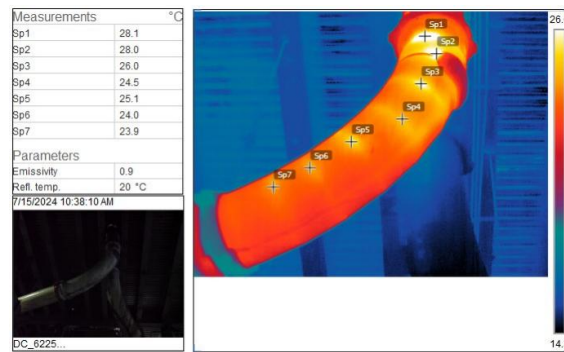


Figura 3.4 Detección de puntos calientes codo.

3.4.5 Ultrasonido para medición de espesores y defectos

El ultrasonido es una técnica no destructiva que emplea un transductor capaz de emitir y recibir ondas ultrasónicas. Estas ondas viajan a través del material hasta llegar a la interfaz entre el material y el aire en el lado opuesto de la pared. En ese punto, una parte de la onda se refleja de regreso al transductor. El equipo de ultrasonido mide el tiempo que tarda la onda en ir y volver, atravesando el material. Conociendo la velocidad del sonido en el material, se calcula el espesor a partir de este tiempo de tránsito [23].

El propósito de la medición de espesores es monitorear la pérdida de material en las tuberías, con el fin de determinar su vida útil restante y la necesidad de reparaciones o reemplazos. Dado que el patrón

de corrosión no es uniforme, es fundamental realizar varias lecturas cercanas al punto inicial o dentro de un área determinada, para obtener un diagnóstico más preciso del estado del ducto [12].



Figura 3.5 Inspección espesores tubería de relave.

3.4.6 Método de memoria magnética del metal

Técnica no invasiva que detecta anomalías en tuberías ferromagnéticas a través de variaciones en su campo magnético natural. Permite identificar zonas de estrés mecánico asociadas a defectos como corrosión, fisuras y deformaciones, sin necesidad de interrumpir la operación ni realizar excavaciones en el caso de las tuberías soterradas [25].

El método emplea los siguientes equipos para la detección y análisis de anomalías en tuberías:

- **Sensores magnetométricos:** Dispositivos de alta precisión que miden variaciones en el campo magnético para identificar zonas de estrés o defectos estructurales.
- **Sistemas de georreferenciación:** Herramientas que permiten localizar con exactitud las anomalías dentro de la traza del ducto.
- **Software de análisis magnetométrico:** Programa especializado que procesa los datos recopilados y genera mapas de tensiones para la evaluación del estado de la tubería.

3.4.7 Emisión acústica

La Emisión Acústica (EA) es una técnica de ensayo no destructivo que detecta ondas elásticas transitorias generadas por la liberación rápida de energía desde fuentes como deformación plástica, propagación de grietas, erosión, corrosión, impacto o fugas localizadas en un material sometido a esfuerzos. Estas ondas se propagan superficialmente y son captadas por sensores acústicos instalados en la superficie, que convierten el movimiento microscópico en señales eléctricas para su análisis [27].

Esta técnica ha demostrado una alta eficiencia en estudios de evaluación de integridad estructural, detectando fugas y defectos en tanques, recipientes a presión, tuberías, puentes, entre otros. La monitorización de estas ondas permite detectar a tiempo fallos en la superficie interna del material y predecir un mantenimiento que garantice la conservación de los activos industriales tanto estáticos como dinámicos [27].

Además, la EA es una técnica pasiva y avanzada de ensayo no destructivo que puede detectar y localizar corrosión activa en el fondo de tanques de almacenamiento, lo que la convierte en una herramienta valiosa para el monitoreo y mantenimiento de infraestructuras críticas [27].

CAPÍTULO 4: Tuberías de proceso planta concentradora de cobre CCMC

En una planta concentradora de cobre, el proceso de obtención del concentrado involucra el transporte continuo de materiales como mineral, agua, pulpa (mezcla de mineral y agua) y los desechos generados en cada etapa del procesamiento. Para gestionar de manera eficiente los recursos y activos, estas plantas dividen sus operaciones en áreas específicas, cada una con una función estratégica dentro del flujo general del proceso.

En este contexto, se considera como tuberías de proceso a toda red de tuberías involucrada en el transporte de materiales con un papel funcional directo en las etapas de fabricación del concentrado de cobre. Estas tuberías no solo facilitan el movimiento eficiente de la pulpa entre las distintas etapas de procesamiento, sino que también aseguran que el material pase por los tratamientos necesarios para alcanzar la concentración requerida de cobre.

A continuación, se detallan los sistemas de tuberías de proceso, diferenciando las áreas de trabajo a las que pertenecen y su función en estas.

4.1 Área de molienda

El área de molienda se encarga de recibir el mineral proveniente del chancado primario, reducir su tamaño y clasificarlo. La planta cuenta con dos líneas de molienda designadas como fase I y fase II, cada una equipada con un molino SAG, dos molinos de bolas, dos baterías de ciclones y un sistema de impulsión. Este sistema eleva la pulpa desde el pozo hasta la batería de ciclones, para luego dirigirla a la siguiente área del proceso.

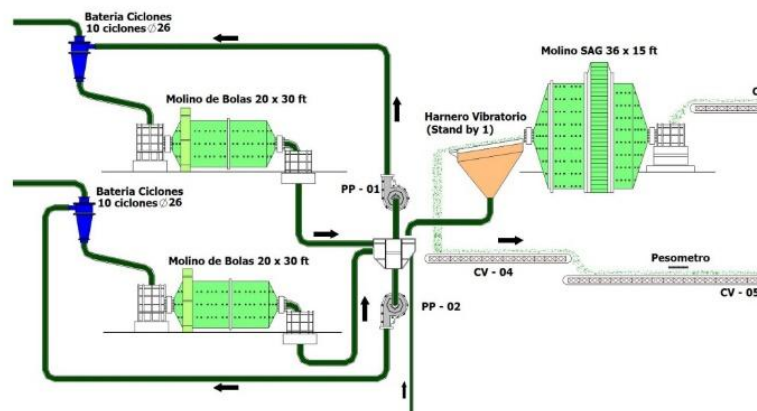


Figura 4.1 Área de molienda planta concentradora.

El sistema de tuberías del área tiene como función principal transportar la pulpa mineral generada por el molino SAG, la cual ha sido previamente clasificada en los harneros. Desde allí, la pulpa es conducida desde un estanque de almacenamiento hacia las baterías de ciclones. En estas, el mineral contenido en la pulpa es nuevamente clasificado: las partículas finas son enviadas al proceso de flotación, mientras que el material de mayor tamaño (sobretamaño) es redirigido a los molinos de bolas para su posterior molienda. El sistema cuenta con tres líneas de impulsión por fase, dos en funcionamiento permanente y una en reserva, en caso de alguna falla o mantenimiento a la línea.

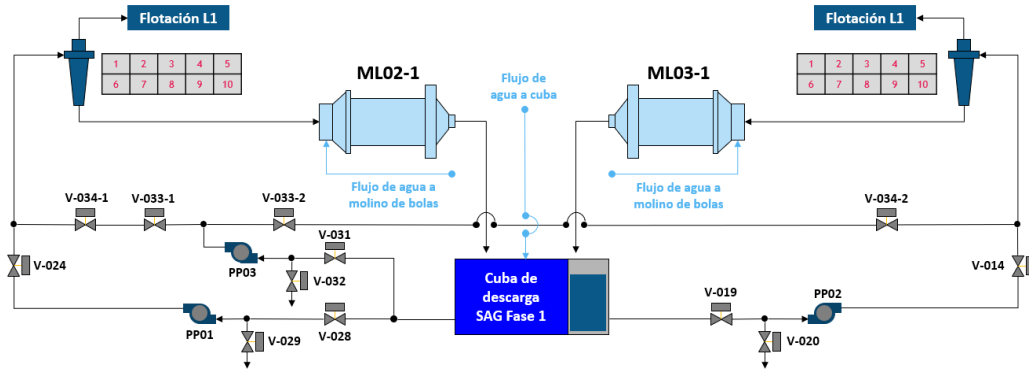


Figura 4.2 Esquema sistema de impulsión molienda.

4.2 Área de Pebbles – Fase III

El área de Pebbles se encarga de recibir el mineral de sobretamaño que es rechazado por los harneros luego de los molinos SAG en las fases I y II. En esta área, el mineral es sometido a una reducción de tamaño en un chancador, tras lo cual es transportado mediante cintas hasta un molino de barras para su posterior procesamiento. La fase III comprende el circuito que se inicia en el molino de barras y continúa hasta que la pulpa se integra con las fases I y II.

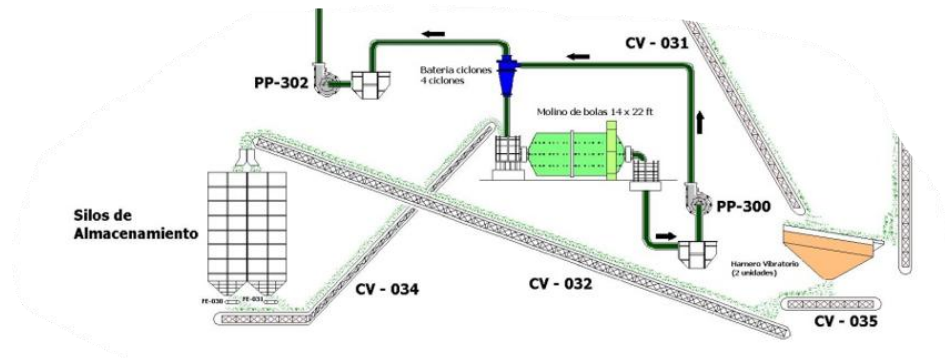


Figura 4.3 Esquema fase III.

El sistema de tuberías comprende desde el molino de barras hasta un chute pantalón que distribuye el mineral a la fase I y II. Este circuito cuenta con dos líneas de impulsión, cada una accionada por una bomba independiente. El sistema está diseñado para que solo una línea opere a la vez, permitiendo realizar intervenciones, como recambios y mantenimientos, en la línea inactiva. Además, ambas líneas están interconectadas para garantizar flexibilidad y continuidad operativa.

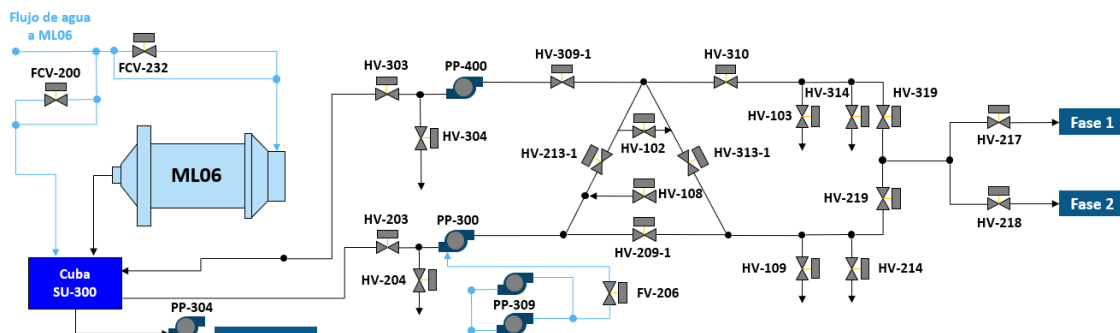


Figura 4.4 Esquema sistema de impulsión fase III.

4.3 Área de flotación

Al igual que en el área de molienda, el área de flotación está compuesta por dos fases idénticas (Fase I y Fase II), que reciben el concentrado proveniente del proceso de molienda. La pulpa ingresa a la primera celda de flotación tipo Rougher, donde comienza la separación del concentrado de cobre. El mineral extraído se transporta mediante ductos hacia un pozo de almacenamiento, mientras que el resto de la pulpa se dirige a las siguientes celdas para continuar con el proceso de separación. Este ciclo se repite hasta la última celda, donde la pulpa, con bajos niveles de concentrado, es clasificada como relave y descartada.

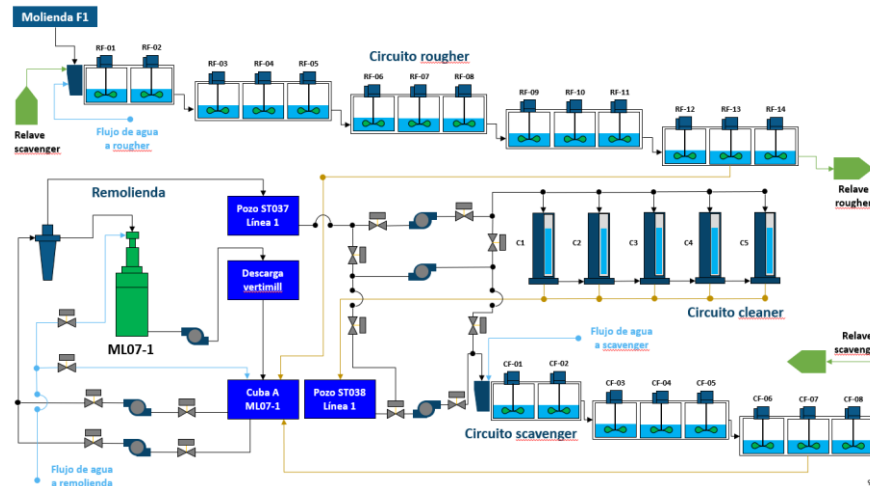


Figura 4.5 Esquema área de flotación.

El sistema de tuberías en el área de flotación es responsable de transportar el concentrado de cobre desde los estanques receptores, donde las celdas de flotación Rougher y Scavenger depositan el material obtenido. Desde estos puntos, el concentrado es conducido a través de las diferentes columnas de flotación Cleaner y Recleaner, donde se realiza una mejora progresiva en la calidad del producto. Finalmente, el material concentrado es enviado a los espesadores de concentrado para su posterior procesamiento y manejo.

4.4 Área de espesador y filtro

Los espesadores de concentrado utilizan la gravedad para separar el agua del mineral, logrando concentrar los sólidos y facilitando su transporte y tratamiento posterior. Al mismo tiempo, permiten la reutilización del agua en el proceso. El concentrado se transporta por gravedad hacia un cajón, desde donde un sistema de tres bombas lo impulsa a través de una red de tuberías. Este sistema se divide en dos fases idénticas, donde el mineral es clasificado por un harnero banano. El concentrado fino continúa hacia los filtros, mientras que el material rechazado es dirigido a un pozo de almacenamiento. Desde allí, un sistema de dos bombas lo devuelve a los espesadores para su reprocesamiento.

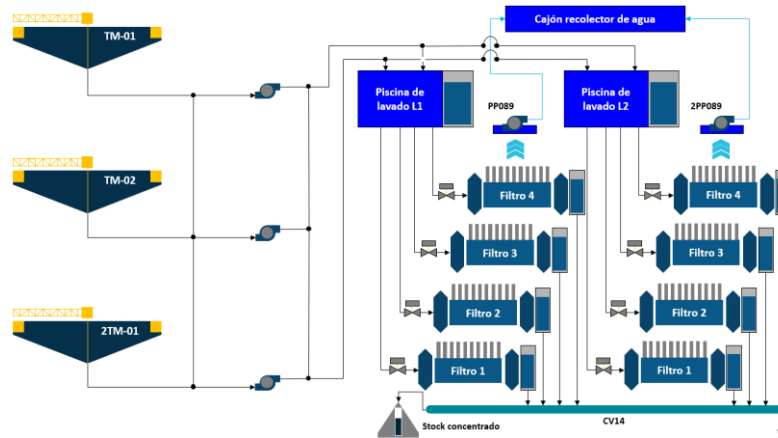


Figura 4.6 Esquema área de espesadores y filtro.

El área de espesadores de concentrado y filtrado cuenta con dos sistemas principales de tuberías que interconectan todos los equipos. El primer sistema de tuberías transporta el concentrado desde los tres espesadores hacia las etapas posteriores del proceso. Las líneas de ductos provenientes de los espesadores convergen en un manifold central, desde donde tres bombas verticales, configuradas en paralelo (dos en operación y una en reserva), impulsan el concentrado hacia el harnero tipo banano de las fases I y II. Este harnero realiza una clasificación adicional para separar el material que requiere reprocesamiento del que puede avanzar hacia la etapa de filtrado.

El segundo sistema está diseñado para manejar el material rechazado por el harnero. Este concentrado rechazado es redirigido a través de una red de tuberías hacia un cajón de redistribución. Desde este punto, dos bombas de piso impulsan el material de regreso hacia los espesadores, cerrando el ciclo de reprocesamiento y asegurando que se aproveche al máximo el mineral contenido en el concentrado.

Las características de las tuberías son:

4.5 Área de relave

El área de relave en una planta concentradora de cobre es fundamental para la gestión adecuada de los residuos generados durante el proceso de concentración del mineral. Su principal función es almacenar y manejar los relaves, que son los desechos resultantes después de extraer el cobre. Además, una buena gestión del relave permite la recuperación del agua utilizada en el proceso, la cual puede ser reciclada y reutilizada en la planta concentradora.

El área de relave consta de diferentes etapas por donde los residuos del proceso son distribuidos hasta llegar al tranque de relave, donde se realiza la deposición definitiva de este subproducto, por lo que para entender el proceso se explicaran estas etapas junto con el propósito y el sistema de tuberías correspondiente.

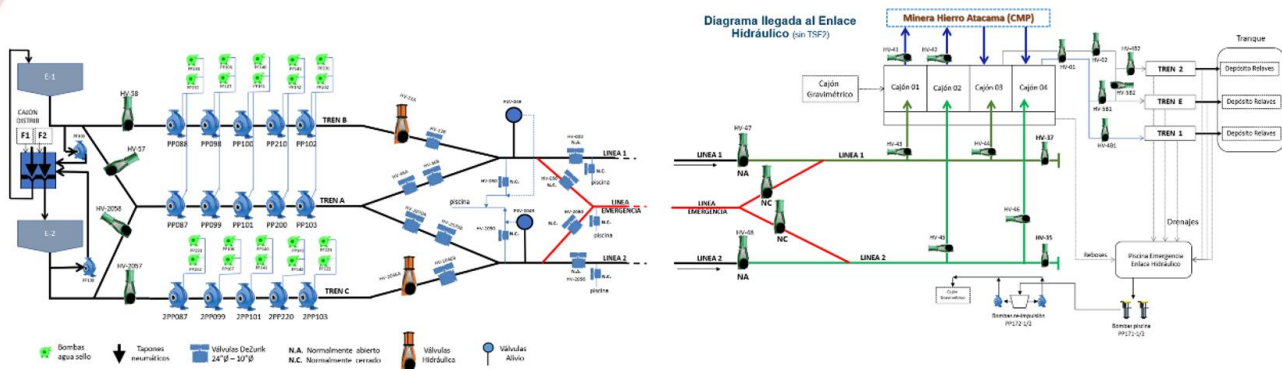


Figura 4.7 Esquema área de relave.

El sistema de tuberías del área de relaves está diseñado para gestionar el transporte y disposición de los residuos generados durante el proceso de concentración. Este sistema comienza con múltiples líneas que recogen el flujo de relave desde los diferentes procesos de la planta y lo dirigen hacia una red principal. Desde allí, las tuberías principales, equipadas con estaciones de bombeo y válvulas de control, regulan los caudales para garantizar un flujo constante y acorde a las necesidades operativas. El material es luego conducido a cajones de distribución, que dividen los flujos hacia distintas líneas secundarias según los requerimientos específicos de disposición. Estas líneas transportan el relave hacia los depósitos finales. El diseño incluye redundancia operativa, con múltiples líneas y válvulas que permiten desviar flujos en caso de mantenimiento o contingencias, así como un control preciso del flujo mediante válvulas y compuertas, lo que asegura la continuidad del proceso y la eficiencia en el manejo de los relaves.

CAPÍTULO 5: Modelo de gestión de mantenimiento de tuberías de proceso

El modelo de gestión de mantenimiento está diseñado para garantizar la operatividad, confiabilidad y eficiencia de los sistemas de tuberías en la planta concentradora. Se basa en un enfoque estructurado y cíclico que integra cuatro pilares fundamentales: Evaluar, planificar, implementar y mejorar. Cada una de estas etapas permite gestionar los activos críticos de manera proactiva, optimizando recursos y minimizando riesgos, al tiempo que se fomenta una cultura de aprendizaje y optimización continua.

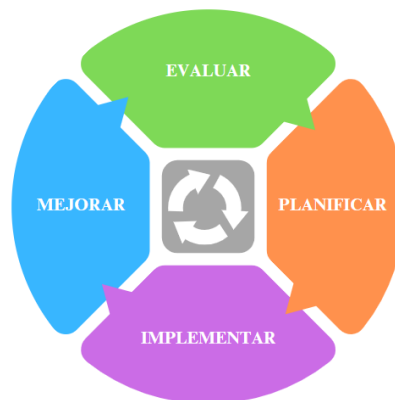


Figura 5.1 Esquema modelo de gestión de mantenimiento tuberías de proceso.

5.1 Evaluar

Establecer las bases del modelo de mantenimiento al analizar los activos y su importancia dentro de la operación. Se definen metas claras para el mantenimiento. Además, se identifican y catalogan las tuberías en función de sus características y su papel en el proceso, evaluando el impacto de posibles fallas mediante un análisis de riesgo. Esto permite priorizar los activos según su criticidad y establecer un enfoque estratégico para el mantenimiento.

5.2 Planificar

Una vez identificados los activos clave, se diseña un plan de acción que contemple estrategias de mantenimiento específicas según la prioridad de cada sistema. Esto incluye definir las actividades necesarias, su frecuencia y los recursos que se requerirán para ejecutarlas, como personal, herramientas y presupuestos. El objetivo es garantizar que las acciones estén bien estructuradas y alineadas con las necesidades operativas de la planta.

5.3 Implementar

En esta etapa, el plan de mantenimiento se lleva a la práctica. Las actividades programadas se ejecutan de acuerdo con el cronograma, empleando tecnologías de monitoreo para asegurar que las condiciones de las tuberías sean óptimas. También se establecen protocolos para responder a fallas imprevistas, minimizando su impacto en las operaciones y asegurando una resolución rápida y efectiva.

5.4 Mejorar

La mejora continua es fundamental para perfeccionar el modelo. Se utilizan indicadores de desempeño para medir la efectividad de las acciones realizadas, identificando oportunidades de optimización. Las lecciones aprendidas durante la ejecución se documentan para evitar errores recurrentes y replicar buenas prácticas. A través de este proceso, se ajusta el modelo según los resultados obtenidos, asegurando su sostenibilidad y eficacia a largo plazo.

CAPÍTULO 6: Metodología para implementar el modelo de gestión.

Se diseñó una metodología específica para implementar el modelo de gestión de mantenimiento, enfocada en garantizar una aplicación efectiva y adaptada a las particularidades de los sistemas de tuberías en la planta concentradora. Esta metodología, compuesta por pasos claros y estructurados, tiene como objetivo asegurar la ejecución coordinada de cada fase del modelo, maximizando los beneficios operativos y reduciendo los riesgos asociados. Cada etapa aborda tanto los aspectos técnicos como organizativos del mantenimiento.

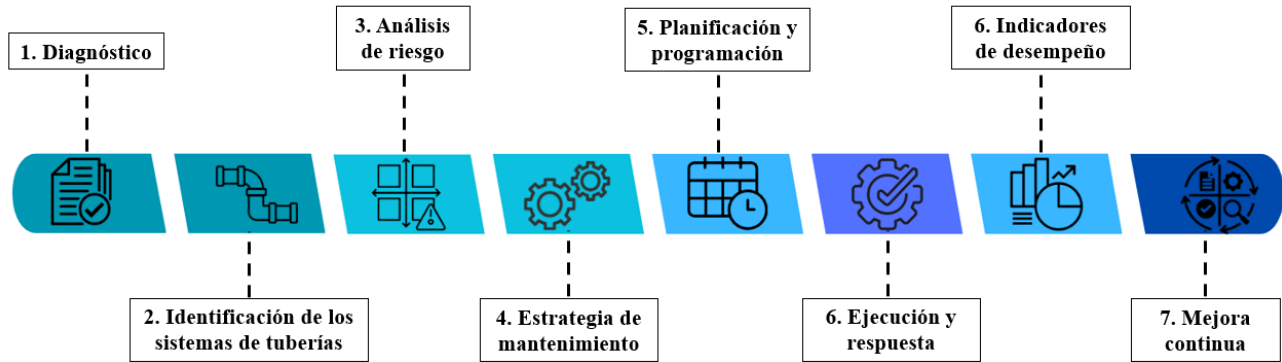


Figura 6.1 Metodología para implementar el modelo de gestión de mantenimiento.

6.1 Diagnóstico

La etapa inicial del modelo de gestión tiene como objetivo analizar cómo se llevan a cabo las actividades de mantenimiento en la organización, proporcionando una visión clara del estado actual y sirviendo como base para los pasos posteriores. Este diagnóstico incluye los siguientes elementos clave:

1. Entendimiento del proceso de mantenimiento:

- Analizar cómo se gestionan actualmente los sistemas de tuberías en la planta.
- Identificar las actividades realizadas, los flujos de trabajo establecidos y las prácticas empleadas en el mantenimiento.
- Evaluar los controles existentes, la información documentada y el cumplimiento de las normativas internas.

2. Definición de objetivos:

- Establecer metas claras y específicas al implementar del modelo.
- Estos objetivos actúan como guía para estratégica para alinear las actividades de mantenimiento con las necesidades y prioridades de la planta.

3. Asignación de responsabilidades:

- Delimitar los roles y funciones de cada miembro de la organización, desde el personal operativo hasta la alta gerencia.
- Asegurar que todos los involucrados comprendan sus responsabilidades en la implementación del modelo y en el cumplimiento de los objetivos establecidos.

6.2 Identificación de los sistemas de tuberías

La identificación y clasificación de los sistemas de tuberías en la planta es un paso esencial para establecer un inventario detallado y estructurado para la planificación y priorización de actividades de mantenimiento. Este inventario no solo permite abordar las necesidades específicas de cada sistema, sino también optimizar los recursos disponibles al centrarse en los sistemas críticos para la operación.

La identificación de los sistemas de tuberías se lleva a cabo mediante una metodología estructurada que incluye tres actividades fundamentales, diseñadas para garantizar la precisión y relevancia de los datos recopilados:

1. **Recolección de información:** Se recopilan datos clave a partir de diversas fuentes internas y externas, combinando análisis documental y revisión de registros históricos. Las principales fuentes de información incluyen:
 - **Planos de diseño y diagramas P&ID:** Se identifican la ubicación, diseño y conexiones de las tuberías, los cuales se verifican durante las inspecciones en terreno para asegurar su exactitud.
 - **Historial de mantenimiento:** Se analizan registros de reparaciones, intervenciones previas y patrones de fallas recurrentes para comprender el desempeño de los sistemas.
 - **Reportes operativos:** Se revisan parámetros operativos como presión, caudal y la composición del fluido transportado para identificar las condiciones de funcionamiento de las tuberías.
2. **Verificación en terreno:** Se realizan inspecciones físicas para contrastar y validar la información obtenida con la realidad operativa de la planta. Esto permite identificar discrepancias entre la documentación y las condiciones reales, asegurando que los datos recopilados sean precisos y confiables.
3. **Documentación de características:** Cada sistema de tuberías y sus complementos se detalla en función de sus atributos técnicos y operativos más relevantes, organizados en las siguientes categorías:
 - **Tuberías:**
 - **Dimensiones:** Diámetro, longitud y espesor.
 - **Material:** Material de construcción y revestimiento interno, si aplica.
 - **Fluido transportado:** Naturaleza del fluido y sus propiedades.
 - **Condiciones operativas:** Presión, temperatura y caudal manejados.
 - **Tipo de elementos:** Conexiones como codos, Tees, Yees o tramos rectos.
 - **Historial de fallas:** Frecuencia y naturaleza de las fallas registradas.
 - **Válvulas:**
 - **Identificación:** Ubicación y tipo de válvula.
 - **Especificaciones:** Material de construcción, clase y método de operación.
 - **Uniones:**
 - **Tipo:** Clasificación de la unión, como bridas, soldaduras o acoples.
 - **Material:** Material de construcción.
 - **Especificaciones:** Características técnicas específicas según el tipo de unión.

6.3 Análisis de riesgo y criticidad.

La tercera etapa del modelo de gestión de mantenimiento se centra en identificar, analizar y priorizar los riesgos asociados a los sistemas de tuberías. Este análisis permite detectar puntos vulnerables,

jerarquizar los activos en función de su criticidad y enfocar los esfuerzos de mantenimiento en los elementos que presentan mayor impacto potencial en la operación, la seguridad y el entorno.

6.3.1 Modos de falla

El primer paso en el análisis de riesgo es identificar los modos en que los sistemas de tuberías y sus componentes pueden fallar. Este análisis se basa en la revisión de las condiciones de operación, el historial de mantenimiento y las características de diseño de los activos. Las áreas clave a considerar incluyen:

1. Historial de mantenimiento y registro de fallas:

- Revisar los registros previos de mantenimiento, incluyendo fallas, reparaciones, informes de incidentes y paradas no programadas.
- Identificar patrones de fallas recurrentes.

2. Condiciones operativas:

- Evaluar cómo interactúan los fluidos transportados con los materiales de las tuberías, considerando factores como corrosión o abrasión.
- Analizar situaciones de sobrecarga, cambios bruscos en las condiciones de operación y posibles influencias ambientales que puedan afectar el desempeño.

3. Características de los componentes:

- Examinar las propiedades técnicas de las tuberías, válvulas y uniones, como compatibilidad con los fluidos, resistencia estructural y capacidad de soportar las condiciones de operación.

6.3.2 Causas y consecuencias

Tras identificar los modos de falla, es fundamental analizar sus causas y consecuencias para entender su impacto en la operación, la seguridad, los costos y el medio ambiente.

1. Análisis de causas (¿Por qué ocurre la falla?):

Cada modo de falla se examina a través de las siguientes categorías:

- **Diseño:** Verificar si existen errores en el diseño inicial o si los materiales y especificaciones son inadecuados.
- **Operativas:** Determinar si el sistema opera fuera de sus parámetros de diseño.
- **Externas:** Identificar agentes ambientales o externos que puedan causar daño, como corrosión atmosférica o impactos físicos.
- **Mantenimiento:** Evaluar si las fallas son producto de mantenimiento deficiente, incorrecto o insuficiente.
- **Vida útil:** Considerar si el activo ha superado su vida útil prevista, aumentando la probabilidad de falla.

2. Evaluación de consecuencias ¿Qué ocurre cuando falla?:

El análisis de consecuencias se centra en el impacto que cada falla puede tener en diferentes áreas:

- **Impacto en operación:**
 - **Interrupción del flujo:** Detención parcial o total del transporte de fluidos, afectando la continuidad del proceso.
- **Impacto en la seguridad:**
 - **Riesgos para la salud:** Exposición a fluidos peligrosos que puedan causar lesiones al personal o a comunidades cercanas.
- **Impacto económico:**
 - **Reparaciones:** Costos asociados a la reposición de componentes y materiales dañados.
 - **Perdida de producción:** Reducción en los ingresos debido a la interrupción del flujo de trabajo.
- **Impacto ambiental:**
 - **Riesgos a la comunidad:** Contaminación de fuentes de agua potable o terrenos agrícolas, así como la exposición a sustancias peligrosas.

6.3.3 Jerarquización de activos

La jerarquización de activos en los sistemas de tuberías se realiza mediante un análisis cualitativo que combina dos factores principales: la probabilidad de falla (PoF) y las consecuencias de falla (CoF). Este enfoque permite priorizar los activos incluso cuando la información histórica es limitada, asegurando que los recursos se asignen estratégicamente a los elementos más críticos.

Evaluación de las consecuencias de falla (CoF): Las consecuencias de una falla se evalúan considerando su impacto en tres áreas clave: la operación productiva, la seguridad del personal y el medio ambiente. Cada criterio se clasifica en niveles de criticidad (alta, media y baja) según la magnitud del impacto.

Tabla 6.1 Criterios de riesgos de falla.

Crterios	Criticidad	Nº	Explicación
Operación	Alta	3	La falla detiene completamente el proceso en ambas fases.
	Media	2	La falla afecta una fase del proceso.
	Baja	1	La falla no interrumpe el proceso.
Seguridad	Alta	3	Riesgo severo para la vida o la integridad del personal
	Media	2	Lesiones leves o exposición controlada a peligros
	Baja	1	Sin riesgo para la seguridad
Medio Ambiente	Alta	3	Derrame extenso con impactos en cuerpos de agua, suelos o comunidades.
	Media	2	Derrame moderado, contenido localmente con impacto limitado.
	Baja	1	Derrame mínimo sin contaminación significativas.

La CoF se calcula como la suma de los impactos en estos tres criterios

$$\text{CoF} = \text{Impacto Operacional} + \text{Impacto en la Seguridad} + \text{Impacto en el Medio Ambiente}$$

Mapa de riesgos: Para complementar la tabla, se sugiere la creación de un mapa de riesgos como herramienta visual para identificar zonas críticas y activos vulnerables en la planta. Las características clave del mapa incluyen:

- **Representación visual:** Uso de colores para indicar los niveles de criticidad (por ejemplo, rojo para alta, amarillo para media y verde para baja).
- **Localización geográfica:** Muestra la ubicación específica de cada activo dentro de la planta.
- **Información complementaria:** Incluye datos como modos de falla frecuentes o condiciones críticas asociadas a los activos.

6.3.5 Reevaluación del riesgo

Con el fin de mantener actualizado el análisis de los sistemas de tuberías en función de la evolución de su estado operativo y los datos obtenidos a lo largo del tiempo. Este proceso se fundamenta en la recopilación y análisis de información clave que permita identificar cambios en la condición de los activos y ajustar las prioridades de mantenimiento.

El proceso de reevaluación se basa en recopilar, estructurar y analizar los siguientes datos, obtenidos durante el ciclo de mantenimiento y las inspecciones iniciales:

- **Número de intervenciones:** Información sobre la cantidad y frecuencia de intervenciones realizadas en los sistemas de tuberías, que refleja el desempeño y los problemas recurrentes.
- **Resultados de pruebas e inspecciones:** Datos derivados de inspecciones, pruebas y otros métodos, que permiten evaluar la condición estructural y funcional de las tuberías.
- **Actividades de mitigación implementadas:** Registro de las acciones correctivas o preventivas ejecutadas para reducir riesgos, como recubrimientos, controles operativos o reemplazos de segmentos.
- **Defectos identificados:** Detalle de los tipos, ubicaciones y severidad de los defectos detectados, que facilita identificar patrones de deterioro.
- **Causas de los defectos:** Análisis de las raíces de los problemas detectados, categorizados en factores de diseño, operativos, externos o relacionados con mantenimiento.
- **Vida estimada:** Tiempo esperado en que puede operar de forma segura y eficiente, considerando su material, condiciones de operación, factores ambientales y mantenimiento aplicado.

La reevaluación combina la recopilación de información mencionada con un proceso que permita actualizar el análisis de riesgo inicial. Este enfoque sigue las siguientes etapas:

1. **Consolidación de datos:** Los datos recopilados durante inspecciones, mantenimientos y actividades operativas se organizan en una base de información integrada.
2. **Revisión del análisis cualitativo inicial:** Con la nueva información, se evalúan las probabilidades y consecuencias de falla previamente estimadas, ajustando los factores de riesgo en función de:
 - Cambios en la condición física de los activos.
 - Nueva información sobre el entorno operativo.

- Frecuencia de defectos y eventos no previstos.
- 3. Actualización del análisis de riesgo:** La información recopilada permite realizar un análisis más profundo, incorporando un enfoque cuantitativo basado en métricas y datos específicos, aunque el enfoque inicial puede haber sido cualitativo, con los nuevos datos es posible desarrollar un análisis cuantitativo que considere:
- Tasa de fallas
 - Severidad promedio de los defectos detectados
 - Vida estimada
 - Impactos económicos de fallas previas

Este análisis puede realizarse mediante herramientas estadísticas o modelos predictivos que asignen valores numéricos a los niveles de probabilidad y consecuencia, generando una escala precisa para la priorización.

6.4 Estrategia de mantenimiento.

En esta etapa del modelo de gestión se desarrollan estrategia de mantenimiento adaptadas a las necesidades específicas de los sistemas de tuberías, teniendo como base los resultados del análisis de criticidad y los objetivos operacionales previamente definidos.

6.4.1 Proceso de selección de estrategia de mantenimiento

El proceso de selección de estrategias de mantenimiento se lleva a cabo de manera sistemática, siguiendo un enfoque estructurado que combina aspectos técnicos y operativos de los activos. Este proceso está respaldado por un diagrama de decisiones que guía la elección de la estrategia más adecuada, tomando en cuenta los siguientes factores clave:

- **Criticidad del activo:** Evaluación basada en la probabilidad de falla y sus posibles consecuencias para la operación.
- **Recursos disponibles:** Incluye la evaluación del personal, herramientas, presupuestos y tecnologías accesibles para implementar la estrategia.
- **Historial de fallas:** Análisis de datos históricos para identificar patrones recurrentes y necesidades específicas de mantenimiento.
- **Objetivos operacionales:** Alineación de la estrategia con los objetivos de confiabilidad, disponibilidad y productividad del sistema
- **Factibilidad técnica y económica:** Evaluación de la viabilidad de la estrategia en función de las capacidades técnicas disponibles y el costo-beneficio asociado.

Este enfoque permite seleccionar estrategias que optimicen la operación y garanticen la confiabilidad de los activos. El diagrama de decisión para el proceso de selección de estrategia de mantenimiento se encuentra en el anexo D.

6.4.2 Evaluación de factibilidad de estrategias

La evaluación de factibilidad analiza la viabilidad técnica y económica de implementar estrategias de mantenimiento, considerando las características del activo y los recursos disponibles. Este proceso

identifica la estrategia más adecuada para optimizar la operación, minimizar costos y mitigar riesgos asociados a fallas.

Requisitos para la evaluación:

1. **Información del activo:** Incluye todos los datos recopilados durante la etapa de diagnóstico e identificación de activos, como especificaciones técnicas, historial operativo, condiciones actuales y posibles impactos en la operación.
2. **Información sobre costos:** Considera los costos directos de mantenimiento y reparación, así como los costos indirectos asociados a las fallas, como pérdidas de producción. Además, incluye una evaluación de los recursos necesarios para implementar las estrategias, como nuevas tecnologías, herramientas y costos relacionados con el personal calificado.

Herramientas de evaluación:

1. **Análisis de criticidad:** Basado en la jerarquización de activos, identifica aquellos con mayor impacto en el proceso. Este análisis permite priorizar los activos críticos y, en combinación con herramientas como el FMEA, determinar las fallas potenciales más relevantes.
2. **FMEA:** Identifica posibles fallas en los activos, sus causas y consecuencias, proporcionando una base sólida para desarrollar estrategias de mantenimiento dirigidas a prevenir o mitigar dichas fallas.
3. **Análisis costo beneficio:** Compara los costos asociados a la implementación de diferentes estrategias de mantenimiento frente a los costos derivados de fallas o la inacción. Esto facilita la selección de la estrategia más eficiente y económicamente viable.

Resultados de la evaluación:

Los resultados de la evaluación incluyen la definición del nivel de inversión necesario, considerando los costos de implementación de estrategias avanzadas frente a los costos asociados a las fallas o enfoques tradicionales. También se obtiene un análisis detallado de riesgos, que evalúa las posibles consecuencias de adoptar o no una estrategia específica, identificando impactos en la operación, costos indirectos y sostenibilidad técnica.

Estos resultados permiten priorizar recursos de manera eficiente, enfocándose en los activos y estrategias con mayor impacto en la confiabilidad y disponibilidad del sistema. Además, proporcionan una base sólida para tomar decisiones informadas, garantizando que las estrategias seleccionadas estén alineadas con los objetivos operativos y sean sostenibles en el tiempo.

6.5 Planificación y programación.

La etapa de planificación y programación tiene como objetivo organizar y asignar de manera eficiente los recursos necesarios para implementar las estrategias de mantenimiento definidas. Durante esta etapa, se establecen los momentos óptimos para realizar las actividades de mantenimiento, minimizando interrupciones operativas y maximizando el uso de recursos.

6.5.1 Planificación

La planificación define en detalle las tareas de mantenimiento, sus responsables y los recursos necesarios para su ejecución.

1. **Listado de actividades:** Detallar las tareas específicas para cada activo, alineadas con la estrategia de mantenimiento asignada
2. **Asignación de responsables:** Designar al personal encargado de cada tarea, asegurándose que posea las habilidades y competencias necesarias.
3. **Cálculo de recursos:** Determinar los insumos requeridos para la ejecución incluyendo herramientas, repuestos y materiales.
4. **Organización de recursos:** Garantizar la disponibilidad de los elementos necesarios para llevar a cabo las actividades sin interrupciones. Esto incluye:
 - **Personal:** Determinar la cantidad y el nivel de especialización del personal requerido.
 - **Equipo y herramientas:** Verificar la disponibilidad de herramientas y equipos especializados.
 - **Repuestos:** Asegurar que los componentes críticos estén disponibles para un reemplazo inmediato.
 - **Presupuesto:** Asignar recursos económicos para cubrir el costo de las actividades planificadas.

6.5.2 Programación

La programación organiza las actividades planificadas dentro de un cronograma, priorizando las tareas según la criticidad de los activos y ajustándolas a las ventanas operativas disponibles. Este proceso asegura que las actividades se ejecuten en los momentos más adecuados, con el menor impacto posible en la operación de la planta.

Cronograma detallado

El cronograma debe incluir los siguientes elementos clave:

1. **Frecuencia de actividades:** Definir intervalos basados en la criticidad del activo y la estrategia de mantenimiento, equilibrando la prevención con el uso eficiente de recursos.
2. **Duración de las tareas:** Estimar el tiempo necesario para cada actividad considerando su complejidad, los equipos requeridos y el nivel de especialización del personal.
3. **Coordinación con la operación:** Alinear las intervenciones con las paradas programadas de la planta o periodos de menor demanda operativa para minimizar interrupciones.

6.5.3 Protocolo de manejo de imprevistos

El protocolo para la programación de fallas en los sistemas de tuberías establece los pasos necesarios para gestionar y resolver imprevistos de manera eficiente, minimizando los impactos operativos y asegurando la continuidad del sistema. Este proceso se desarrolla según el diagrama presente en el anexo E.

6.6 Ejecución y respuesta

La etapa de ejecución y respuesta asegura la identificación temprana de fallas o anomalías, el análisis estructurado de los datos obtenidos, la clasificación de defectos y la implementación de estrategias correctivas o preventivas. Asimismo, integra la generación de informes detallados que documentan las condiciones de los sistemas de tuberías, promoviendo una mejora continua.

6.6.1 Proceso de inspección

Las inspecciones son esenciales para monitorear el estado de los sistemas de tuberías y detectar irregularidades de forma temprana. Estas se realizan utilizando tecnologías avanzadas, así como inspecciones visuales en áreas accesibles.

El proceso de inspección se desarrolla en las siguientes etapas:

- **Planificación:** Se definen los objetivos de la inspección, la frecuencia, el alcance y los recursos necesarios, como personal, equipos y tiempo disponible.
- **Ejecución:** Se llevan a cabo las inspecciones de acuerdo con el plan establecido, garantizando una recopilación de datos precisa y consistente. Se documenta cada observación relevante, con énfasis en puntos críticos o áreas vulnerables del sistema.
- **Documentación:** Los resultados se registran en formatos estándar, especificando el estado actual de cada componente inspeccionado.

Tras la recopilación de datos en las inspecciones, se realiza un análisis para identificar patrones, tendencias y posibles indicadores de deterioro. Este análisis se desarrolla en las siguientes fases:

- **Filtrado de datos:** Se eliminan inconsistencias, errores o duplicados para asegurar que la información procesada sea fiable. Esto se realiza mediante la comparación con estándares, valores esperados o límites operativos.
- **Evaluación técnica:** Los datos se analizan para detectar desviaciones respecto a las condiciones normales de operación.
- **Identificación de tendencias:** Se evalúan los datos históricos para establecer patrones de deterioro que puedan anticipar fallas.

Una vez completado el análisis, las anomalías identificadas se clasifican en dos categorías principales para definir las acciones correspondientes:

1. **Imperfección:** Anomalías con dimensiones o características dentro de los límites aceptables que no representan un riesgo inmediato para la operación.
2. **Defecto:** Anomalías cuyas dimensiones o características superan los límites aceptables establecidos, representando un riesgo significativo que requiere intervención inmediata o prioritaria.

Con base en esta clasificación, las anomalías detectadas se jerarquizan según su criticidad, impacto operativo potencial y riesgos asociados, utilizando criterios previamente definidos. Este proceso de

jerarquización permite priorizar y establecer estrategias de respuesta adecuadas, optimizando la asignación de recursos y reduciendo los riesgos operativos.

6.6.2 Condiciones de repuesta

A continuación, se definen las condiciones de respuesta y el nivel de prioridad con el que deben ser gestionadas, asegurando una intervención oportuna y efectiva según la criticidad de cada situación.

Condiciones de respuesta inmediata: Las condiciones de respuesta inmediata corresponden a anomalías o situaciones que representan amenazas graves e inmediatas para la integridad de la tubería. Estas condiciones deben ser mitigadas de inmediato, especialmente si se encuentran en segmentos críticos de la tubería cuya falla podría afectar significativamente la operación, la seguridad o el medio ambiente.

Entre las condiciones que requieren una respuesta inmediata se incluyen:

1. **Pérdida de material significativa:** Cuando la pérdida de espesor del metal supera el 80% del grosor nominal de la pared de la tubería, independientemente de las dimensiones del área afectada.
2. **Grietas críticas:** Grietas cuya profundidad excede el 70% del grosor nominal de la pared de la tubería o cuya magnitud no puede determinarse con precisión debido a limitaciones de las herramientas de medición disponibles.
3. **Abolladuras con indicios de daño estructural:** Cualquier abolladura localizada en la tubería que presente evidencia de hendiduras, fisuras o posibles fracturas que comprometan la estabilidad estructural del sistema.

Condiciones de respuesta a corto plazo: Las condiciones de respuesta a corto plazo son aquellas que, de no ser atendidas, podrían comprometer la integridad de la tubería. El tiempo de intervención varía según la ubicación de la anomalía y su impacto potencial.

Es fundamental que el especialista comprenda los mecanismos de crecimiento asociados a cada anomalía y realicen las verificaciones necesarias para garantizar que el tiempo estimado hasta la falla, incluyendo factores de seguridad apropiados, no sea inferior al tiempo de respuesta estipulado. Este enfoque asegura que las acciones correctivas se lleven a cabo dentro de un plazo seguro y controlado.

Las siguientes condiciones deben ser atendidas dentro de los plazos establecidos para evitar que comprometan la integridad de la tubería:

1. **Pérdida de material cercana a soldaduras o uniones:** Pérdida de espesor de metal superior al 50% del espesor nominal de la pared en proximidad a una soldadura o unión con otra tubería.
2. **Grieta profunda:** Grieta cuya profundidad excede el 50% del espesor nominal de la pared de la tubería.
3. **Corrosión generalizada:** Área de corrosión con pérdida de material que supera el 50% del espesor nominal de la pared.
4. **Abolladura con corrosión:** Abolladura localizada en cualquier sección de la tubería que presente evidencia de corrosión en su interior o exterior.

- 5. Hendidura o surco por daño mecánico:** Hendidura o surco con una pared con una profundidad superior al 12.5% del espesor nominal de la pared, resultado de un daño mecánico.

Condiciones monitoreadas: Las condiciones monitoreadas hacen referencia al registro continuo y al seguimiento de anomalías o características observadas durante las evaluaciones de integridad, con el propósito de identificar cambios que puedan requerir atención futura. Estas condiciones incluyen:

- 1. Condiciones de fabricación o construcción:** Cualquier característica o defecto relacionado con el proceso de fabricación o construcción que deba ser observado de manera periódica.
- 2. Condiciones identificadas por evaluaciones previas:** Anomalías detectadas durante una evaluación de integridad o análisis de datos que, en el momento, no se consideran críticas ni afectan la integridad de la tubería, pero que deben ser monitoreadas para detectar posibles deterioros o evolución en el tiempo.

6.7 Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño tienen como objetivo evaluar la efectividad del modelo de gestión de mantenimiento y el rendimiento de los activos. Estas métricas permiten identificar áreas de mejora, optimizar procesos y garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados en el modelo de manera eficiente.

Además, estos indicadores sirven para establecer metas claras, cuantificables, realistas y alineadas con las prioridades estratégicas de la planta. Las metas deben definirse considerando:

- **Condición inicial:** Valores actuales basados en datos históricos o el desempeño actual.
- **Objetivos estratégicos:** Resultados esperados.
- **Disponibilidad de recursos:** La capacidad técnica, financiera y humanas para implementar las acciones necesarias.

6.7.1 Indicadores de confiabilidad

Los sistemas de tuberías deben operar de manera continua y sin interrupciones imprevistas. Los indicadores de confiabilidad evalúan esta capacidad, asegurando la estabilidad del sistema a largo plazo:

1. Tasa de fallas (MTBF):

- **Objetivo:** Determinar cuánto tiempo puede operar el sistema entre fallas.
- **Utilidad:** Ayuda a identificar activos con alta frecuencia de fallas para priorizar intervenciones correctivas o preventivas.

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo total de operación}}{\textit{Número de fallas}}$$

2. Porcentaje de cumplimiento de inspecciones:

- **Objetivo:** Monitorear si las inspecciones preventivas y/o predictivas se realizan según lo programado.

- **Utilidad:** Garantiza que los planes de mantenimiento estén siendo ejecutados de manera efectiva.

$$\text{Cumplimiento} = \frac{\text{Número de inspecciones realiadas}}{\text{Número de inspecciones planificadas}} \times 100$$

6.7.2 Indicadores de disponibilidad

Estos indicadores miden el tiempo que los sistemas están disponibles para operar, identificando el impacto del mantenimiento en la continuidad operativa:

1. Disponibilidad operativa:

- **Objetivo:** Evaluar cuánto tiempo los sistemas están activos y funcionando en comparación con el tiempo total.
- **Utilidad:** Permite identificar pérdidas de tiempo operativo y optimizar los recursos asignados.

$$\text{Disponibilidad}(\%) = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo total}} \times 100$$

2. Tiempo de inactividad planificada vs no planificada:

- **Objetivo:** Comparar la proporción de tiempo dedicado a mantenimientos programados frente a fallas inesperadas.
- **Utilidad:** Ayuda a reducir tiempos de inactividad no planificada mediante una mejora en las estrategias preventivas.

6.7.3 Indicadores de eficiencia

La gestión eficiente de recursos es clave para mantener el sistema de tuberías operando de manera rentable. Estos indicadores evalúan cómo se utilizan los recursos disponibles:

1. Eficiencia de ejecución de actividades:

- **Objetivo:** Determinar qué porcentaje de actividades se completan en el tiempo y presupuesto planificados.
- **Utilidad:** Identificar problemas en la planificación y ejecución, lo que permite ajustar los procesos.

$$\text{Eficiencia}(\%) = \frac{\text{Número de tareas completadas a tiempo}}{\text{Número de total de tareas planificadas}}$$

2. Costo de mantenimiento por activo:

- **Objetivo:** Medir los gastos de mantenimiento asociados a cada activo.
- **Utilidad:** Identificar activos con altos costos de mantenimiento para evaluar estrategias alternativas.

$$\text{Costo por activo} = \frac{\text{Costo total de mantenimiento}}{\text{Número de activos}}$$

3. Costo por pérdida de producción:

- **Objetivo:** Calcular el impacto económico de las fallas en términos de pérdidas de producción.
- **Utilidad:** Priorizar la atención a activos cuyo tiempo de inactividad genera mayores pérdidas económicas

$$\text{Costo por pérdida de producción} = \text{horas de detención SAG} \times \text{Costo por hora}$$

Integrar estos indicadores en la gestión permite monitorear el progreso hacia los objetivos estratégicos, ajustar procesos en tiempo real y optimizar la operación global de los sistemas de tuberías.

6.8 Mejora continua

La etapa de mejora continua garantiza que el modelo de gestión de mantenimiento se mantenga dinámico y adaptable frente a los cambios en las condiciones operativas, las tecnologías disponibles y las metas organizacionales. Esta etapa utiliza los resultados de los indicadores de desempeño como punto de partida para un ciclo de optimización constante.

Los indicadores de desempeño, definidos en etapas anteriores, son la base para identificar áreas de oportunidad, evaluar el éxito de las estrategias implementadas y realizar ajustes en la planificación y ejecución de las actividades de mantenimiento. El análisis periódico de métricas clave, como la disponibilidad, confiabilidad, costos y eficiencia, permite:

1. **Detección de desviaciones:** Comparar los resultados obtenidos con las metas establecidas para identificar brechas y tendencias negativas, como un aumento en la tasa de fallas o costos superiores a lo planificado.
2. **Diagnóstico de causas:** Analizar las causas de las desviaciones detectadas. Esto puede indicar debilidades de la estrategia planteada y sirve como base para toma de decisiones.
3. **Definición de nuevas acciones:** Establecer planes para cerrar las brechas identificadas, como ajustar la frecuencia de inspecciones, priorizar actividades de mantenimiento basadas en condición o implementar nuevas tecnologías de monitoreo.
4. **Monitoreo del progreso:** Realizar un seguimiento continuo de los indicadores para evaluar si las acciones están logrando los resultados esperados, creando un ciclo de retroalimentación positiva.

La mejora continua también se basa en la recopilación y análisis de lecciones aprendidas, tanto de éxitos como de errores o fallas ocurridas durante la operación y el mantenimiento. Este proceso contribuye a fortalecer el modelo de gestión al identificar patrones y oportunidades de mejora.

1. **Documentación de experiencias:** Registrar de manera sistemática los eventos relevantes, incluyendo las causas de las fallas, las soluciones implementadas y sus resultados.
2. **Aplicación práctica:** Integrar las lecciones aprendidas en las estrategias de mantenimiento, ajustando los planes, procedimientos y estándares utilizados.

Otro aspecto relevante es desarrollo de competencias del personal. A medida que las estrategias evolucionan, el equipo de mantenimiento debe contar con el conocimiento y las habilidades necesarias para implementar los cambios de manera efectiva.

1. **Identificación de necesidades:** Evaluar las competencias actuales del personal en relación con las demandas del modelo de gestión y las tecnologías implementadas.
2. **Planes de formación:** Diseñar programas de capacitación orientados a fortalecer áreas críticas, como el uso de nuevas herramientas tecnológicas, el análisis de datos de monitoreo o la identificación de fallas.

Finalmente, el avance tecnológico ofrece oportunidades significativas para optimizar las estrategias de mantenimiento. La mejora continua incluye la evaluación y adopción de herramientas y metodologías innovadoras que permitan mejorar la eficiencia, reducir costos y anticiparse a fallas.

1. **Evaluación de nuevas tecnologías:** Investigar y analizar tecnologías emergentes.
2. **Pilotos y pruebas:** Implementar proyectos piloto para evaluar la efectividad de las nuevas tecnologías antes de su despliegue a gran escala.
3. **Integración gradual:** Incorporar las innovaciones en los procesos existentes, asegurando su compatibilidad con las estrategias actuales y capacitando al personal en su uso.
4. **Optimización continua:** Utilizar los datos generados por las nuevas herramientas para optimizar aún más las actividades de mantenimiento y mejorar la toma de decisiones.

El proceso de mejora continua se resume en el diagrama de flujo presente en el anexo H.

CAPÍTULO 7: Implementación del modelo de gestión de mantenimiento

El modelo se implementa como piloto en el área de relave debido a la criticidad de su impacto en los procesos operativos. Si por alguna razón los trenes del área de relave se detienen, el proceso de producción de concentrado de cobre también debe detenerse, ya que no es posible eliminar los desechos generados durante la operación.

7.1 Etapa 1: Diagnóstico

El área de relave, como se ha mencionado anteriormente, se encarga de captar y distribuir los desechos generados durante el proceso de obtención de concentrado de cobre. Dentro de la planta, esta área está compuesta por diversas zonas que conducen el relave hacia su disposición final.

Para optimizar su gestión, el área de relave se divide administrativamente en dos sub-áreas. Una de ellas es el **Área 620**, que comprende todo el sistema de tuberías ubicado bajo los espesadores de relave, antes de llegar al enlace hidráulico. Este sistema incluye tres trenes de bombeo, cada uno compuesto por cinco bombas de impulsión. Estas bombas reciben el relave proveniente de los espesadores y lo trasladan hacia el enlace hidráulico.

En el Área 620, las líneas de tuberías están organizadas en los trenes A, B y C. Los trenes B y C operan continuamente para garantizar el flujo del relave, mientras que el tren A se mantiene en reserva

y entra en funcionamiento únicamente en caso de fallas en los trenes principales. Esta configuración asegura una operación confiable y reduce los riesgos de interrupciones en el proceso.

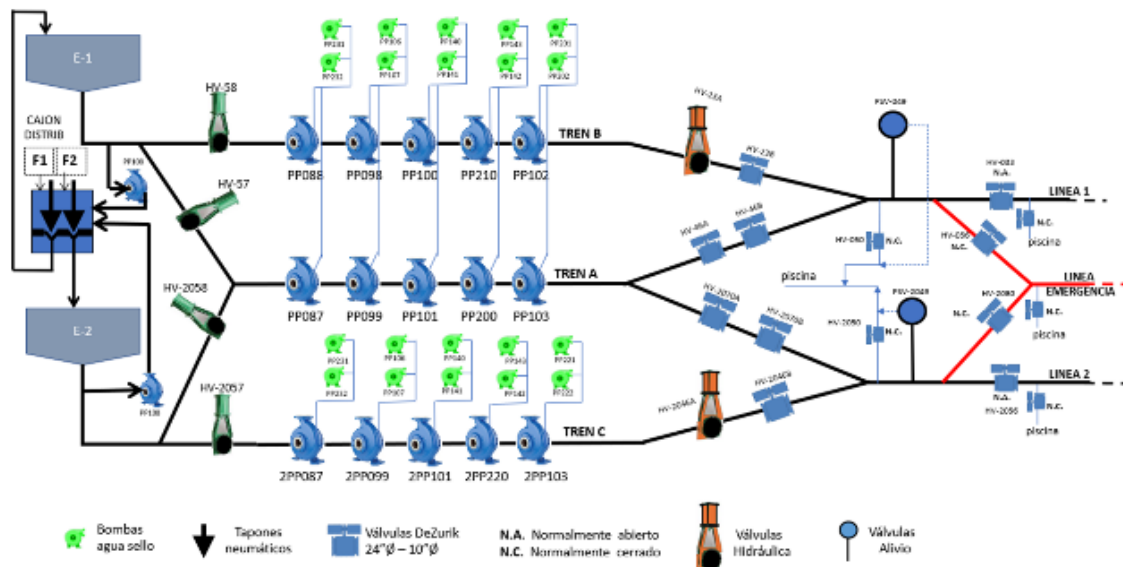


Figura 7.1 Esquema de área 620.

La planta cuenta con dos espesadores de relave que alimentan los sistemas de bombeo. El tren B extrae el relave del espesador 1, mientras que el tren C se encarga del relave proveniente del espesador 2. Por su parte, el tren A, designado como sistema de emergencia, está conectado a ambos espesadores, lo que permite su utilización en caso de fallas en cualquiera de los trenes principales.

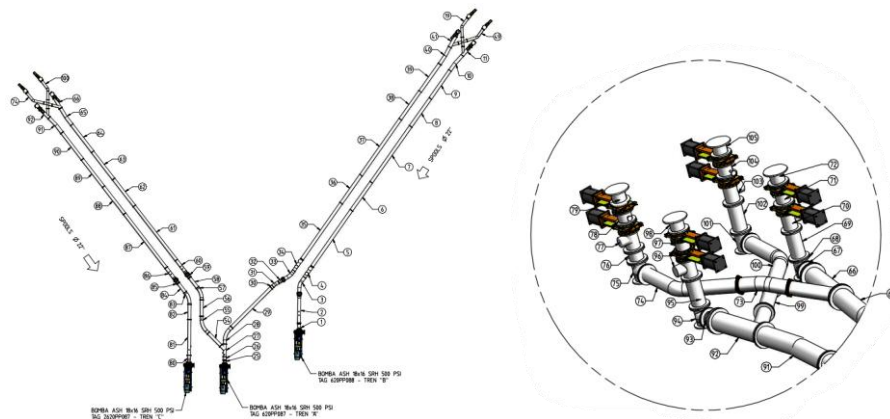


Figura 7.2 Distribución de tuberías de succión área 620.

Para controlar el flujo de los trenes, justo debajo de cada espesador se ha instalado un sistema compuesto por dos válvulas. Una de ellas se utiliza para regular el flujo, permitiendo abrir y cerrar el paso del relave hacia el tren correspondiente. La segunda válvula, que normalmente permanece abierta, se cierra únicamente cuando es necesario realizar mantenimiento o reemplazo de la válvula principal de uso regular.

La distribución de las bombas de impulsión está representada en la figura 7.4, donde se detalla la disposición y configuración de cada componente del sistema.

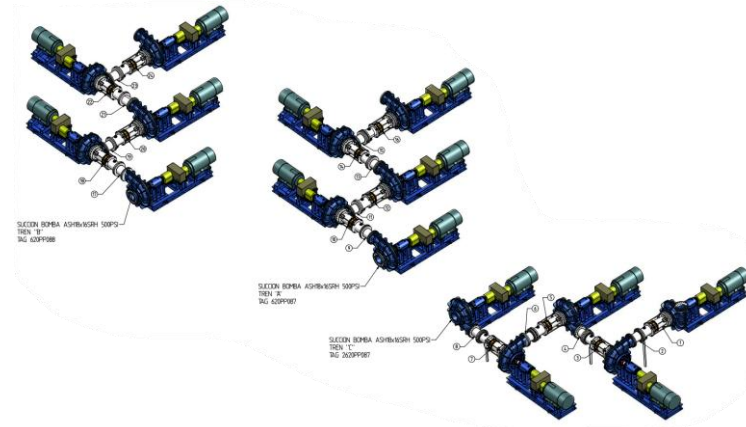


Figura 7.3 Distribución de trenes de bombas área 620.

Las líneas de descarga de los trenes de bombas están equipadas con un sistema de conexión que permite su integración con el tren de emergencia. Este diseño asegura que, en caso de mantenimiento o falla en alguno de los trenes principales, el tren de emergencia pueda asumir la operación de manera inmediata, garantizando la continuidad del proceso.

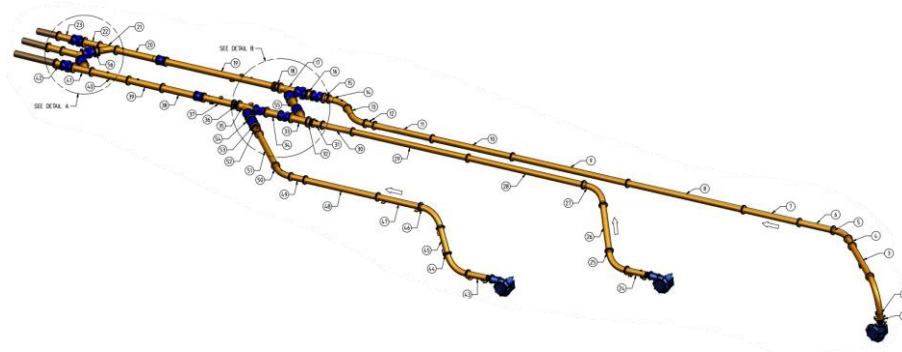


Figura 7.4 Líneas de descarga de trenes de bombas.

El tramo final de esta área está compuesto por las tuberías de impulsión, las cuales están instaladas de manera soterrada o parcialmente soterrada hasta alcanzar el enlace hidráulico.

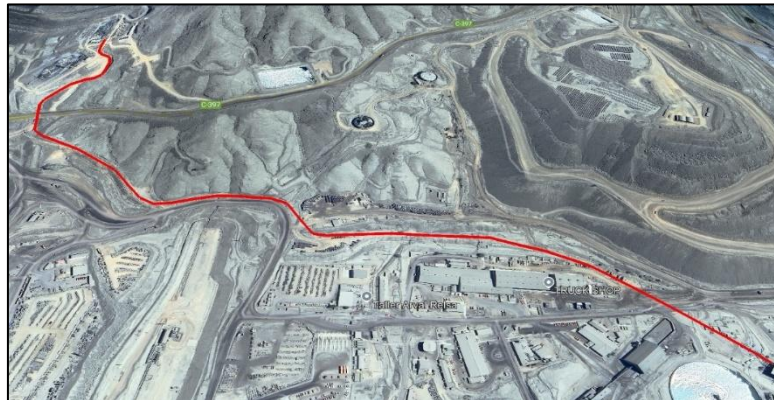


Figura 7.5 Recorrido de líneas soterradas.

La otra sub-área es el **enlace hidráulico**, recibe su nombre debido a que en esta sección la planta concentradora deposita el relave en dos cajones de almacenamiento que son utilizados por la Compañía de Minería del Pacífico (CMP) para extraer el hierro presente en el relave. Tras completar su proceso, CMP transfiere el relave a otros dos cajones de almacenamiento, desde donde es succionado e impulsado en dos etapas consecutivas.

En la primera etapa (TSF 1), tres trenes con tres bombas en serie impulsan el relave hacia el siguiente punto del sistema. En la segunda etapa (TSF 2), los mismos trenes cuentan con dos bombas adicionales en serie, diseñadas para alcanzar la elevación requerida por el tranque actual. Esta división de las etapas responde a un ajuste del diseño original: el TSF 1 fue concebido para llevar el relave al tranque antiguo, cuya cota era menor. Para cumplir con las exigencias del tranque actual, fue necesario añadir bombas adicionales en el TSF 2, incrementando la capacidad de impulsión.

La distribución de los sistemas TSF 1 y TSF 2 se muestra en las figuras 7.7 y 7.8, donde se detalla la disposición de las bombas y las conexiones entre las líneas.

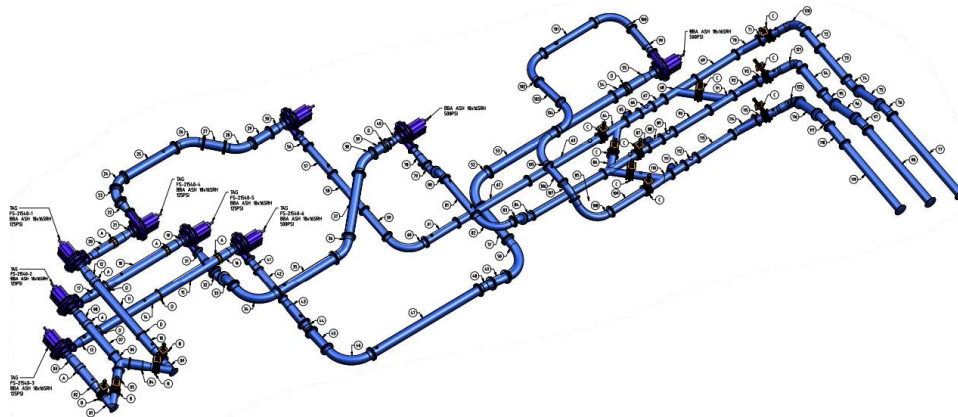


Figura 7.6 Distribución TSF 1.

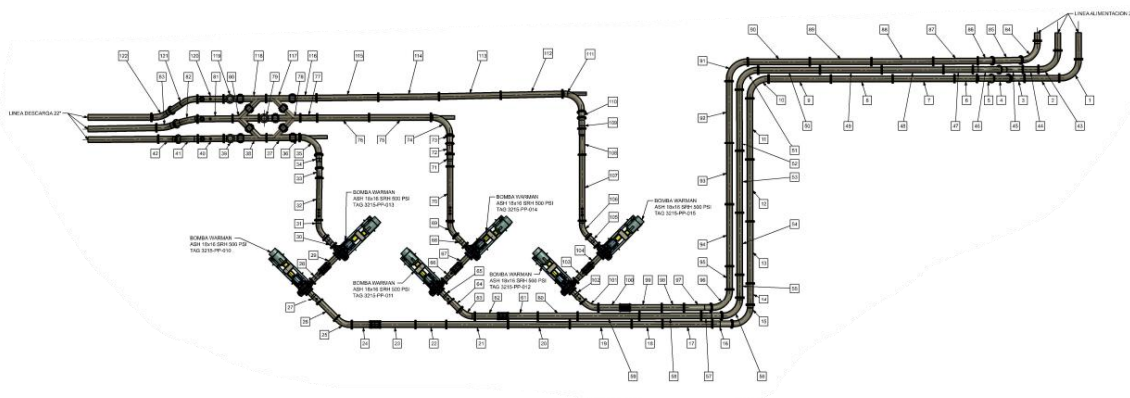


Figura 7.7 Distribución TSF 2.

Una vez comprendida la distribución y las etapas del área, es fundamental analizar cómo se gestiona actualmente el mantenimiento de estos sistemas de tuberías y qué actividades se llevan a cabo. Este análisis incluye la revisión de las estrategias de mantenimiento implementadas, los protocolos de

inspección y las acciones correctivas, preventivas y predictivas que se realizan para garantizar la confiabilidad y la disponibilidad de las tuberías en cada etapa del proceso.

Primero es necesario conocer las estrategias de mantenimiento en la planta concentradora, donde a lo largo del año, se llevan a cabo diversas actividades de mantenimiento que requieren la detención programada de los principales equipos con el fin de garantizar la operatividad y confiabilidad del proceso. Estas detenciones se clasifican en tres tipos:

- 1. Mantenciones Mayores:** Consisten en la detención de una fase completa del proceso durante un período prolongado, generalmente entre 4 a 6 días. Durante este tiempo, se ejecutan actividades de mantenimiento en todas las áreas de la fase intervenida, permitiendo la revisión y reparación de equipos críticos.
- 2. Mantenciones Menores:** Similar a las mantenciones mayores, estas intervenciones implican la detención de toda una fase del proceso, pero con una duración significativamente menor, comprendida entre 8 a 12 horas. Se enfocan en trabajos de mantenimiento específicos que no requieren tiempos extensos de ejecución.
- 3. Corte General de Energía:** Se trata de una detención total de la planta concentradora, con una duración de entre 12 a 24 horas. En este periodo, se realizan actividades de mantenimiento en los equipos de las estaciones eléctricas, asegurando la fiabilidad del sistema eléctrico. Adicionalmente, pueden ejecutarse otras tareas de mantenimiento en la planta mientras dure la interrupción del suministro energético.

El mantenimiento que se realizan actualmente en los sistemas de tuberías consiste en actividades de monitoreo de condición, las cuales están programadas para ciertos elementos o etapas y que han sido creadas en base a eventos correctivos que han ocurrido. Las actividades específicas de mantenimiento, así como la frecuencia y la asignación por área y tren, se detallan en el Anexo G.

Las actividades de monitoreo implementadas, si bien permiten conocer el estado actual de los activos mediante diversas técnicas, presentan limitaciones significativas. No se contrastan los datos obtenidos con un historial de fallas, ni se analiza la tendencia de deterioro en los elementos, lo que impide una detección temprana y proactiva de fallas. En la mayoría de los casos, las alertas solo se activan cuando la situación ya es crítica.

Como consecuencia, han ocurrido eventos en los que, a pesar de contar con indicios previos de defectos en los activos, únicamente se emitieron avisos sin realizar un seguimiento de la evolución del problema ni un análisis más detallado que permitiera tomar medidas preventivas.

Asimismo, existen zonas dentro del sistema que no son consideradas dentro del plan de monitoreo, lo que deja segmentos de la infraestructura sin control preventivo, aumentando el riesgo de fallas inesperadas.

Otro aspecto crítico es la ausencia de un registro sistemático sobre la confiabilidad y vida útil de los activos. Para evaluar estos parámetros, sería necesario llevar un control detallado de cambios, mantenimientos y actividades realizadas en las líneas y sus componentes. Sin embargo, actualmente

no existe un mecanismo formal para este seguimiento, y el único registro disponible es la orden de trabajo en SAP, lo que limita el análisis integral de la condición de los activos a lo largo del tiempo.

Para finalizar la etapa de diagnóstico, conocido el contexto actual sobre el mantenimiento de los sistemas de tuberías ahora se define la meta u objetivo que se desea lograr al implementar este modelo.

7.1.1 Objetivo

Establecer una estrategia de mantenimiento para el área de relave que tenga en cuenta las necesidades específicas de cada etapa y considere las actividades en función de la jerarquización de los activos.

7.1.2 Responsabilidades

Para lograr el objetivo propuesto y con el fin de mantener un orden y control del avance se establece las responsabilidades de cada parte del sistema organizacional de la empresa. Para esto se desarrolló una matriz RACI para definir claramente las responsabilidades asignadas a cada integrante de la estructura organizacional. Los roles considerados en esta matriz son los siguientes:

- **G:** Gerente
- **SG:** Subgerente
- **IC:** Ingeniero en confiabilidad
- **P:** Planificador
- **SA:** Supervisor área
- **PT:** Personal técnico

Tabla 7.1 Matriz de RACI para la aplicación del modelo de gestión.

Actividad	G	SG	IC	P	SA	PT
1.- Identificación y jerarquización de activos	A	C	R	I	I	I
2.- Elaboración de estrategia de mantenimiento	A	C	R	C	I	I
3.- Planificación de actividades	C	A	C	R	I	I
4.- Programación de actividades	C	C	I	R	A	I
5.- Ejecución de actividades y reporte de riesgo	I	I	I	I	C	R
6.- Supervisión de actividades	C	C	C	I	R	I
7.- Análisis y registro de actividades	I	C	R	C	I	I
8.- Identificación de mejoras	A	C	R	C	I	I

Las siglas RACI representan:

- **R:** Responsable – Persona encargada directamente de ejecutar la actividad o tarea.
- **A:** Aprobar – Persona con la autoridad final para aprobar o garantizar que la tarea sea completada satisfactoriamente.
- **C:** Consultado – Persona cuya experiencia o conocimiento es requerido como apoyo para realizar la tarea.
- **I:** Informado – Persona que debe recibir información sobre el progreso o los resultados de la tarea.

7.2 Etapa 2: Identificación de los sistemas de tuberías

En esta sección se detalla el inventario de activos pertenecientes al sistema de tubería del área de relave. Los activos se han clasificado en las siguientes categorías:

1. **Tuberías:** Esta categoría abarca todos los elementos relacionados con tuberías de impulsión, descarga y conexión.
2. **Complementos:** Incluye accesorios como flanges, uniones y válvulas, esenciales para la funcionalidad del sistema.

El listado completo de elementos, junto con sus principales características, se presenta el anexo B.

En la figura 7.9 se ilustran los principales elementos del sistema de tuberías descritos en las tablas anteriores. Estos incluyen diversos tipos de Spools, como el lateral, recto, tee, codo y de reducción, los cuales forman parte de la configuración del sistema de tuberías en el área de relave.

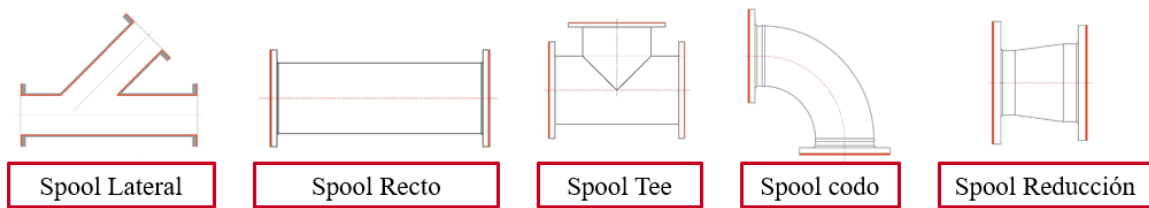


Figura 7.8 Elementos de tuberías

7.3 Etapa 3: Análisis de riesgo y criticidad

Las fallas en las tuberías pueden ocasionar desde pequeñas interrupciones operativas hasta incidentes graves que comprometen la seguridad, el medio ambiente y la rentabilidad de la planta. Por ello, identificar y comprender los tipos más comunes de fallas es esencial para desarrollar estrategias de mantenimiento. Cada uno de los modos de falla se ha sido identificado de acuerdo con un historial de eventos recopilados en RMES y la literatura.

A continuación, se presenta un diagrama de Pareto que muestra las fallas registradas en los sistemas de tuberías del área de relave. Es importante señalar que el análisis abarca todos los sistemas relacionados y no se limita únicamente a las tuberías.

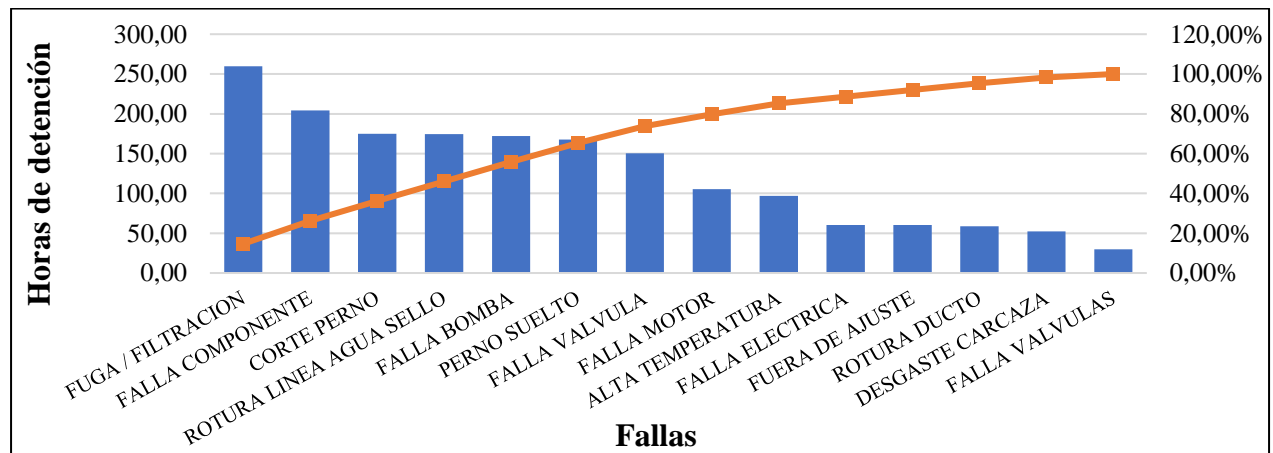


Figura 7.9 Pareto de fallas área de relave obtenido de RMES.

7.3.1 Modos de falla, causas y efectos

En esta sección se presentan los principales modos de falla en las tuberías de proceso, junto con sus causas y efectos asociados. Cada tipo de falla tiene un impacto directo en la confiabilidad del sistema y su capacidad para operar eficientemente.

Rotura: Es la fractura o separación completa del material que compone la tubería, lo que interrumpe el flujo de fluidos y puede provocar derrames o fugas [28]. Puede ser causada por varios factores entre los que se encuentran:

- **Abrasión interna:** El transporte de material abrasivo, como lodos con alto nivel de minerales, implica el movimiento de partículas sólidas que causan un desgaste acelerado en las paredes internas del ducto. Incluso en tuberías con revestimiento interno, este desgaste se vuelve evidente con el tiempo, lo que resulta en un adelgazamiento de la pared interna del ducto y, eventualmente, puede llevar a la rotura de este [28].



Figura 7.10 Ejemplo de abrasión en la pared de la tubería [29].

- **Fatiga del material:** Las variaciones cíclicas de presión o temperatura pueden provocar fatiga en los materiales de las tuberías, lo que a su vez puede dar lugar a la aparición de microfisuras. Si estas microfisuras no se detectan a tiempo, pueden agrandarse y eventualmente causar una rotura [28].
- **Defectos en fabricación o instalación:** Los defectos en los materiales o en los procesos de fabricación (como soldaduras deficientes) o una mala instalación del sistema de tuberías pueden debilitar los ductos y hacerlos propensos a fallo [30].
- **Corrosión interna/externa:** La corrosión en sistemas de tuberías es un proceso de deterioro del material debido a interacciones químicas y electroquímicas con el entorno, afectando tanto las superficies internas como externas de las tuberías [31].



Figura 7.11 Tubería con alto grado de corrosión.

Fugas: Son escapes no controlados de fluidos a través de las paredes de las tuberías, así como en uniones y conexiones. Estas filtraciones pueden variar en magnitud, desde pequeñas hasta significativas, y pueden ser provocadas por algunas de las siguientes causas:

- **Ajustes inadecuados:** Si las conexiones de las tuberías no están correctamente alineadas o apretadas, es posible que se formen pequeñas grietas o espacios donde el fluido se filtre [28].
- **Daños mecánicos:** Los impactos mecánicos externos, ya sean golpes accidentales durante la operación o vibraciones excesivas, pueden generar fisuras o fracturas pequeñas que permiten la filtración de fluido [28].
- **Fallas en uniones:** Las juntas y uniones entre tramos pueden degradarse con el tiempo debido a la exposición vibraciones y temperaturas. Si los sellos de las juntas se deterioran es común que se produzcan filtraciones [28].

Con base en los modos de falla detectados, se desarrolló un análisis FMEA, el cual permitió evaluar de manera sistemática las fallas, sus causas y sus efectos. Este análisis incluyó los siguientes elementos:

1. Identificación de los modos de falla
2. Evaluación del impacto
3. Determinación de índices de criticidad
4. Propuesta de acciones correctivas

El análisis se presenta detalladamente en el Anexo C, donde se incluyen todos los puntos descritos anteriormente.

7.3.2 Jerarquización de activos

Tras comprender los modos de falla de los activos en los sistemas de tuberías y sus efectos asociados, se establecieron rangos de prioridad para cada elemento del sistema, basándose en el análisis FMEA y en la escala de riesgo previamente definida en las tablas 6.2 y 6.3. Este enfoque permitió jerarquizar los activos según su nivel de criticidad (alta, media y baja), proporcionando una visión más clara de los elementos que requieren atención prioritaria.

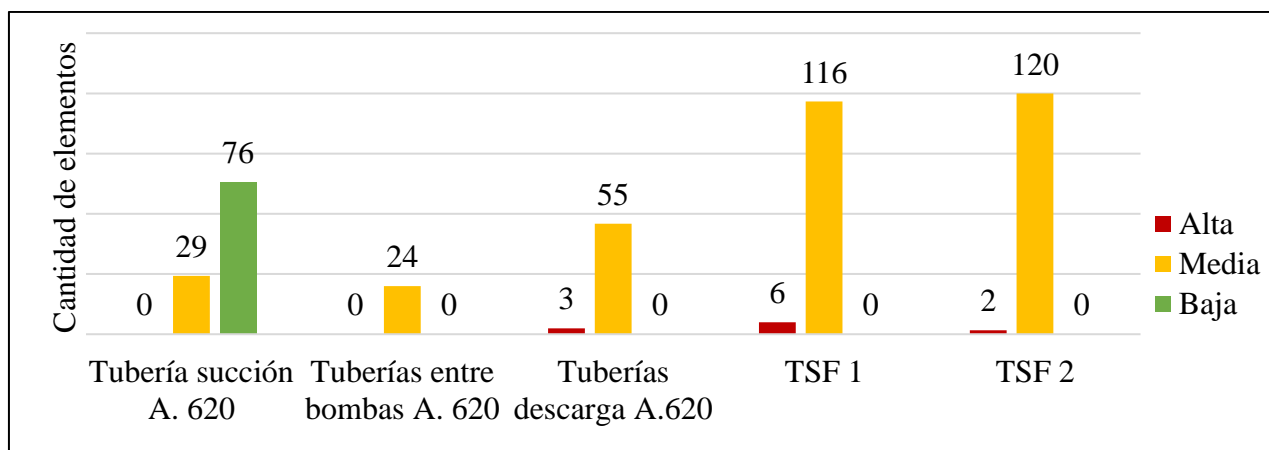


Figura 7.12 Distribución de la criticidad de los elementos de tuberías.

Los resultados de los análisis mostrados en el gráfico reflejan la distribución de los elementos de tuberías según su nivel de criticidad en los distintos tramos y sistemas del área de relave. La

clasificación evidencia que la mayoría de los activos se sitúa en un rango de criticidad media, mientras que aquellos con criticidad alta y baja constituyen una proporción menor.

Es importante señalar que, dentro de cada nivel de criticidad, existe una jerarquización interna, puesto que cada categoría abarca un rango de valores. Esto implica que, incluso dentro de la misma clasificación, algunos activos pueden ser más críticos que otros, lo que establece un orden de prioridad que posibilita una gestión de mantenimiento más precisa y efectiva.

En el anexo H, se encuentra los mapas de calor de los activos más críticos dentro del área de relave, destacando su ubicación

7.4 Etapa 4: Estrategias de mantenimiento

Tras la jerarquización de los activos, es fundamental analizar la estrategia de mantenimiento a aplicar en función de su criticidad, tal como se ilustra en la figura 6.2. El proceso de clasificación de los elementos de los sistemas de tuberías del área de relave proporciona una base sólida para seleccionar la estrategia más adecuada.

El primer paso consiste en evaluar el impacto de cada activo en la operación. En este sentido, los elementos con criticidad alta y media requieren una revisión más detallada para garantizar su confiabilidad y mitigar riesgos. No obstante, el monitoreo de condición vigente no siempre prioriza los componentes más críticos, lo que puede provocar deficiencias en su control.

Además, la frecuencia de monitoreo, en particular la medición de espesores se realiza únicamente una vez al año, lo cual resulta insuficiente para predecir el desgaste y vigilar la progresión de posibles defectos.

En consecuencia, se propone ajustar la frecuencia de monitoreo y establecer un plan de inspección centrado en los elementos críticos, incluyendo aquellos que actualmente carecen de una estrategia definida. Esta optimización, sustentada en las herramientas y tecnologías disponibles en la planta, permitiría fortalecer la gestión de mantenimiento sin requerir grandes inversiones adicionales.

7.4.1 Estrategia basada en análisis predictivo y monitoreo de condición:

El área 620 se divide en cuatro secciones, donde a cada una se le asignó una estrategia de mantenimiento en función de la criticidad de sus activos.

1. Tuberías de succión

En esta sección se identificaron elementos de baja y media criticidad, siendo estos últimos clasificados así por su impacto en la seguridad del personal y su geometría compleja. Para prevenir fallas y mitigar riesgos se propone un monitoreo de bajo costo:

Tabla 7.2 Estrategia y actividad implementada en tuberías de succión área 620.

Estrategia	Actividad	Frecuencia	Duración estimada
Preventiva	Inspección visual	4 semanas	1 hora
Predictiva	Termografía	8 semanas	1 hora

2. Tuberías entre bombas:

Aquí todos los elementos tienen criticidad media debido a la seguridad, condiciones operativas y geometría. Existe un plan de medición de espesores adecuado, por lo que solo se complementa con inspecciones visuales:

Tabla 7.3 Estrategia y actividad implementada en tuberías entre bombas área 620

Estrategia	Actividad	Frecuencia	Duración estimada
Preventiva	Inspección visual	4 semana	1 hora
Predictiva	Medición de espesor	26 semanas	2 horas

3. Tuberías de descarga

Se identificaron 3 elementos de alta criticidad y 6 de criticidad media con impacto significativo en el proceso. Actualmente no existe una estrategia definida, por lo que se propone:

Tabla 7.4 Estrategia y actividad implementada en tuberías de descarga área 620.

Estrategia	Actividad	Frecuencia	Duración estimada
Preventiva	Inspección visual	4 semana	1 hora
Predictiva	Termografía	8 semanas	1 hora
Predictiva	Medición de espesores	16 semanas	2 horas

4. Tuberías soterradas hacia enlace hidráulico

Clasificadas con criticidad media, estas tuberías cuentan actualmente con una inspección televisiva anual; sin embargo, en la práctica, esta se realiza cada tres meses durante las detenciones de planta, sin que el plan haya sido formalmente actualizado.

Adicionalmente, es fundamental considerar la protección de las tuberías contra la corrosión, dado que se encuentran enterradas y expuestas a condiciones que pueden acelerar su deterioro. Asimismo, no se ha contemplado la inspección del tramo descubierto, lo que representa una oportunidad de mejora en la estrategia de monitoreo.

Tabla 7.5 Estrategia y actividad implementada en tuberías de descarga área 620.

Estrategia	Actividad	Frecuencia	Duración estimada
Predictiva	Medición de espesores a tramo descubierto	26 semanas	4 horas
Preventiva	Inspección televisiva	12 semanas	6 horas
Preventiva	Instalación de sistema de protección catódico	-	-
Preventiva	Mantenimiento sistema de protección catódico	6 meses	2 horas

5. Tuberías enlace hidráulico

Dado que esta sub-área presenta condiciones operativas similares en sus distintas etapas, se plantea una estrategia conjunta para optimizar su monitoreo y mantenimiento.

En estas etapas se han identificado 8 elementos de alta criticidad y 4 de criticidad media, los cuales tienen un impacto directo en el proceso. El resto de los activos, debido a sus condiciones de operación y seguridad, se clasifican mayoritariamente con criticidad media.

Actualmente, las actividades de inspección no abarcan toda el área y, como se mencionó previamente, la frecuencia de monitoreo podría ser insuficiente para un análisis detallado o un adecuado seguimiento de defectos detectados.

Tabla 7.6 Estrategia y actividad implementada en tuberías enlace hidráulico.

Estrategia	Actividad	Frecuencia	Duración estimada
Predictiva	Medición de espesores	16 semanas	6 horas
Predictiva	Inspección termográfica	8 semanas	4 horas
Preventiva	Inspección visual	4 semana	2 horas

7.4.2 Estrategia preventiva de cambio de elementos críticos y monitoreo de condición

Siguiendo el proceso descrito en la figura 6.2, se busca comparar técnica y económicamente la viabilidad de realizar cambios preventivos únicamente en los activos críticos, previamente identificados, y evaluar si esta estrategia puede complementarse con un monitoreo más económico. El objetivo es optimizar recursos, evitando fallas catastróficas mediante una combinación de inspección y reemplazo selectivo de componentes.

Para este análisis, se recopilaron datos económicos sobre costos de monitoreo y cambio, a fin de evaluar la factibilidad de la estrategia propuesta. Los activos para cambiar corresponden a los 11 activos considerados con criticidad alta, los cuales se presentan en las figuras 7.18, 7.19 y 7.20 marcados con color rojo.

Costos de monitoreo de condición

Los costos asociados al monitoreo de condición se obtuvieron a partir del balance anual del departamento correspondiente. Para este análisis, se consideraron los costos de las horas de trabajo del personal técnico y especializado en técnicas predictivas, así como el costo diario por el uso de equipos específicos, incluyendo cámara termográfica, equipo de ultrasonido y robot de inspección televisiva.

Tabla 7.7 Costos asociados al monitoreo de condición.

Tipo de costo	Valor (CLP)
Costo HH especialista	\$ 42.825
Costo HH técnico	\$ 13.000
Costo diario uso de equipos	\$ 57.185

Los costos asociados al cambio preventivo de los elementos de tuberías se determinaron a partir de una cotización del proveedor para los materiales, complementada con el promedio de costos de cambio basado en las órdenes de trabajo del año 2024. Este cálculo incluye todos los aspectos relacionados con el proceso, como el uso de grúas, personal capacitado, herramientas y materiales necesarios para el desmontaje e instalación del elemento.

Tabla 7.8 Costos asociados al cambio preventivo de elementos críticos

Tipo de costo	Valor (CLP)
Elemento de tuberías	\$ 1.800.000 – \$ 4.000.000
Costo de cambio	\$ 3.862.976

Para comparar ambas estrategias, se analizarán en función del Costo Anual Equivalente (CAE). En este caso, se considera el costo anual del monitoreo, basado en todas las inspecciones propuestas, junto con la estrategia de cambio de 11 elementos críticos y un monitoreo de condición básico. Este monitoreo incluye inspecciones termográficas, visuales y televisivas en las áreas correspondientes.

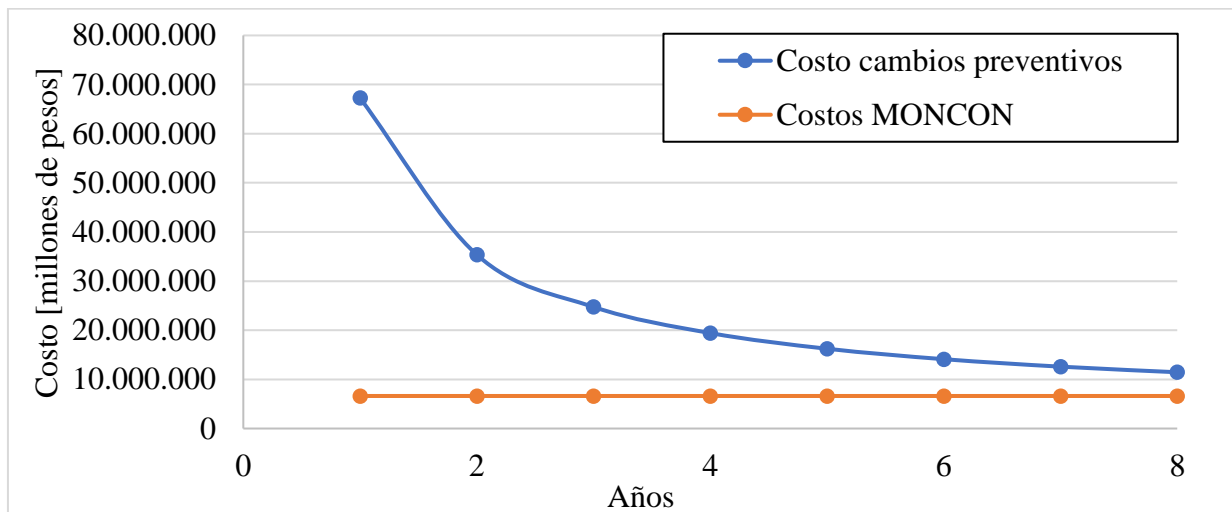


Figura 7.13 Comparación del costo anual equivalente entre estrategias propuestas.

A partir del quinto año, la estrategia de cambios preventivos combinados con monitoreo básico se vuelve más viable desde el punto de vista económico. Sin embargo, en el contexto actual del sistema de tuberías, no se cuenta con datos precisos sobre la vida útil de los ductos, lo que implica que una implementación de cambios preventivos basados únicamente en costos podría ser riesgosa. Esto podría derivar en fallas inesperadas, afectando la producción, el medio ambiente y la seguridad de los trabajadores.

Por lo tanto, se adopta inicialmente una estrategia basada en análisis predictivo y monitoreo de condición de las tuberías, con el objetivo de generar una base de datos confiable que permita retroalimentar y optimizar la estrategia de mantenimiento a futuro.

7.5 Etapa 5: Planificación y programación

Ya establecidos las estrategias y la frecuencia de las actividades estas se deben planificar. esto permite estructurar las actividades necesarias para la intervención de los elementos de tuberías, asegurando la disponibilidad operativa y optimizando los tiempos de ejecución.

7.5.1 Planificación y programación de inspecciones

En la planificación y programación del mantenimiento de tuberías en la planta concentradora, es fundamental considerar que las actividades de inspección, a excepción de la inspección televisiva, no requieren la detención de la línea de proceso. Esto permite que dichas actividades sean programadas de manera flexible, adaptándose a la disponibilidad de personal y a la planificación general del mantenimiento.

En contraste, la inspección televisiva, que generalmente se realiza mediante el uso de cámaras de inspección interna, sí requiere la detención del sistema para permitir la inserción y el recorrido del equipo dentro de las tuberías. Por lo tanto, esta actividad debe ser planificada dentro de ventanas de mantenimiento previamente establecidas para minimizar su impacto en la operación.

En el caso aplicado, se definieron los recursos, plazos de entrega y oportunidades de intervención para la ejecución del mantenimiento en el área de relave, considerando la criticidad de los activos y las restricciones operacionales.

1. Inspección visual:

Objetivo: Evaluar el estado externo de las tuberías, identificando signos de corrosión, fugas, deformaciones u otros defectos visibles.

Programación: Programar en turnos normales de operación, sin necesidad de afectar la producción

Recursos Requeridos:

- **Personal:** Inspector de mantenimiento o técnico en inspección visual con experiencia en tuberías.
- **Equipos:** Linternas de alta potencia y cámaras de alta resolución.
- **Documentación:** Formatos de inspección estandarizados y registros históricos de las tuberías inspeccionadas.

2. Medición de espesores:

Objetivo: Determinar la pérdida de material de las tuberías debido a corrosión o abrasión.

Programación: Programar en turnos normales de operación, sin necesidad de afectar la producción

Recursos requeridos:

- **Personal:** Técnico especializado en ensayos no destructivos con certificación mínima de nivel I en ultrasonido.

- **Equipos:** Medidores de espesores ultrasónicos con calibración certificada y acoples adecuados para medición precisa.
- **Documentación:** Planos de referencia de las tuberías y valores históricos de medición previa.

3. Termografía:

Objetivo: Identificar anomalías en la temperatura de las tuberías que puedan identificar desgaste en el elemento.

Programación: La inspección debe realizarse preferentemente cuando las tuberías están en operación normal, para capturar datos reales de temperatura.

Recursos requeridos:

- **Personal:** Técnico en termografía certificado
- **Equipos:** Cámara termográfica con software de análisis de imágenes térmicas
- **Documentación:** Parámetros normales de operación para interpretación de imágenes térmicas

4. Inspección televisiva:

Objetivo: Evaluar el estado interno de las tuberías, mediante la introducción de un robot con cámara de alta resolución, permitiendo detección de fisuras, deformaciones, pérdida de revestimiento u otro defecto estructural.

Programación: La inspección debe realizarse en ventanas de mantenimiento planificadas para evitar impactos en la producción, se debe programar durante detenciones mayores programadas de la planta.

Requisitos:

- **Tren:**
 - Realizar un lavado del tren a inspeccionar, este tiene una duración de aproximadamente 1 hora.
 - Abrir escotilla de acceso o desmontar válvula para introducir el robot.
 - La tubería no debe superar una pendiente de 45 grados.
 - Instalar la estación de monitoreo y conexión del robot.
- **Personal:** Es necesario contar con personal técnico en inspecciones no destructivas con capacidad de manejo del robot y personal técnico para la preparación de la línea y el montaje y desmontaje del equipo.
- **Documentación:** Planos y especificaciones de la tubería junto con el requisito de inspecciones previas.

7.5.2 Planificación de cambio de activos

Para realizar el reemplazo de elementos en las tuberías, es fundamental contar con los siguientes recursos técnicos y humanos:

- **Equipo de izaje:** Necesario para manipulación segura de componentes de gran tamaño y peso.
- **Herramientas de montaje y desmontaje:** Para la instalación y remoción de los activos.

- **Andamios:** Requeridos cuando se necesita acceso a áreas elevadas o de difícil alcance.
- **Personal capacitado:** Especializado en montaje y maniobras seguras de izaje.
- **Transporte:** Para movilizar los elementos de recambio hasta el sitio de intervención.
- **Materiales complementarios:** bridas, juntas y sellos para garantizar una instalación segura y efectiva

La logística de adquisición y reemplazo de los activos es un factor determinante en la planificación del mantenimiento. Se establecieron los siguientes plazos de entrega para los principales elementos de recambio basados en la información del proveedor.

Tabla 7.9 Tiempos de entrega para activos.

Activo	Plazo de entrega
Spools	8 semanas
Válvulas reparadas	8 semanas
Válvulas nuevas	32 semanas

El tiempo requerido para el reemplazo de activos en las tuberías varía entre 6 y 8 horas, dependiendo de la complejidad de la intervención y el acceso a la zona de trabajo. Debido a esto, es fundamental establecer criterios para determinar los momentos más adecuados, minimizando el impacto en la operación y optimizando recursos de mantenimiento.

Para lograr una gestión eficiente, se han definido las mejores oportunidades de intervención de acuerdo con el nivel de criticidad de los activos, diferenciándolos en dos categorías principales:

1. Activos con criticidad alta y media:

- Su intervención debe realizarse dentro de mantenimientos programados, ya sean mayores o menores, garantizando la disponibilidad de equipos y personal especializado.
- En caso de fallas imprevistas, se debe contar con un plan de contingencia para una respuesta rápida y efectiva.

2. Activos con criticidad baja:

- Su reemplazo puede realizarse según la disponibilidad del tren, implementando un cambio al tren de emergencia cuando sea necesario.
- Se recomienda coordinar estas intervenciones junto a otras actividades de mantenimiento para optimizar los tiempos de inactividad.

7.6 Etapa 6: Ejecución y respuesta

Si bien el modelo de gestión de mantenimiento se está implementando, hasta el momento no se han llevado a cabo inspecciones detalladas sobre el estado de las tuberías. Por esta razón, se opta por establecer un plan de acción basado en la estructura del modelo, con el objetivo de iniciar y optimizar los procesos de inspección, monitoreo y respuesta ante anomalías.

Estandarización de procesos de inspección y respuesta

Para garantizar la correcta ejecución de las inspecciones, se definen protocolos detallados que abarcan la planificación, ejecución y documentación de los hallazgos. Este proceso incluirá:

- La definición de procedimientos específicos para la evaluación de tuberías, considerando las tecnologías disponibles.
- La digitalización de los registros de inspección, permitiendo una trazabilidad eficiente de las condiciones detectadas.
- La integración de un sistema de clasificación de anomalías que permita una toma de decisiones basada en la criticidad de cada hallazgo.

Priorización de anomalías y asignación de recursos

A partir de los datos obtenidos en las inspecciones, se procederá a la clasificación de anomalías según su impacto en la operación. Esto permitirá:

- Implementar alertas tempranas para condiciones críticas.
- Optimizar la asignación de recursos en función del nivel de riesgo de cada anomalía.
- Evaluar la factibilidad de acciones correctivas o preventivas según el estado real de las tuberías.

Seguimiento y mejora continua

Dado que aún no se han realizado inspecciones, es fundamental establecer un mecanismo de seguimiento que permita evaluar el desempeño del modelo una vez que se inicien estas actividades. Para ello, se consideran indicadores clave como:

- **Tiempo de respuesta a fallas detectadas:** Para medir la eficacia del proceso de inspección y reacción ante anomalías.
- **Reducción de tiempos de detención en la operación:** Comparando periodos de inactividad antes y después de la implementación de las inspecciones.
- **Evolución de anomalías monitoreadas:** Para identificar tendencias en el deterioro y ajustar estrategias de mantenimiento.

La información recopilada en las primeras inspecciones permitirá reevaluar y ajustar el modelo de gestión, asegurando su efectividad en la prevención de fallas y optimización de la operación.

7.7 Etapa 7: Indicadores de desempeño

En el área de relaves, los indicadores de desempeño actualmente disponibles no son representativos para la evaluación específica del estado de las tuberías. Esto se debe a que la información proviene directamente de la plataforma RMES, la cual registra detenciones y fallas de manera general en diversos equipos asociados, como sistemas de agua de sello, bombas y sistemas de lubricación, además de eventos en el sistema de tuberías en su conjunto. Sin embargo, esta base de datos no desglosa la información a nivel de componentes individuales dentro del sistema de tuberías, lo que impide identificar con precisión el comportamiento y la criticidad de elementos específicos. Como consecuencia, no es posible obtener datos relevantes sobre los elementos más críticos del sistema, dificultando la toma de decisiones fundamentadas para la optimización del mantenimiento y la gestión de fallas.

Tabla 7.10 Indicadores obtenidos de RMES

Sub-área	Trenes	MTBF [Horas]	MTTR [Horas]
Área 620	Tren A	1140	33.2
	Tren B	1131	48.9
	Tren C	906.1	32.1
Enlace Hidráulico	Tren 1	2448	17.03
	Tren 2	2481	22.2
	Tren de emergencia	7523	18.3

Por lo tanto, según lo establecido en el modelo de gestión propuesto, el ingeniero en confiabilidad, como responsable de la actividad, debe llevar un control riguroso y un registro detallado de los eventos ocurridos en el sistema, incluyendo sus causas y posibles consecuencias. Esta gestión sistemática permitirá identificar tendencias, evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento y optimizar la planificación de intervenciones. Este enfoque se ilustra en la tabla 6.6, donde se detalla la información para la recopilación y análisis de datos.

La única información relevante que puede servir como referencia en la reevaluación del modelo es el costo asociado a la pérdida de producción debido a fallas en el sistema de tuberías. Durante el año 2024, se registraron un total de 2.59 horas de detención en los molinos SAG como consecuencia de fugas y filtraciones en el sistema de tuberías. Considerando un costo por pérdidas estimado de 40 mil dólares por cada hora de detención de un molino SAG, la pérdida total de producción asciende a 103.600 dólares.

Este dato constituye un punto de referencia clave para evaluar la efectividad del modelo de gestión de mantenimiento propuesto. En una reevaluación futura, sería posible comparar este indicador con los costos registrados tras la implementación del modelo, permitiendo medir el impacto de las estrategias aplicadas en la reducción de tiempos de detención y optimización del desempeño del sistema. Además, complementar esta evaluación con otros indicadores, como la tasa de fallas, el tiempo medio entre fallas y el costo de mantenimiento correctivo, proporcionaría un análisis más integral del desempeño del sistema de tuberías y la efectividad del plan de mantenimiento implementado.

7.8 Etapa 8: Mejora continua

Ya que no se cuenta con la cantidad de información necesaria para obtener un análisis de los indicadores de desempeño realista para los trenes o para cada elemento en específico, la sección de mejora continua corresponde a la recomendación de tecnologías de monitoreo que pueden ser aplicadas al sistema.

7.8.1 Sensor de desgaste de revestimiento interno

Como se ha mencionado previamente, las tuberías del área están recubiertas internamente con poliuretano, un material que protege la pared de los ductos contra la abrasión generada por el fluido. Este revestimiento se desgasta a un ritmo más lento que el acero. Sin embargo, con la tecnología actual de medición de espesores, no es posible evaluar directamente su estado.

Para abordar esta limitación, se propone la implementación de un sensor de desgaste del revestimiento interno. Este sensor es compatible únicamente con un tipo específico de recubrimiento suministrado por el mismo proveedor. La tecnología empleada en este revestimiento incorpora filamentos de cobre en su estructura. A medida que el revestimiento se deteriora, estos filamentos entran en contacto con el fluido, generando una señal que indica el porcentaje de desgaste. El sensor es capaz de emitir alertas cuando el revestimiento ha alcanzado un 50% y un 75% de desgaste, lo que permite estimar la tasa de deterioro y programar intervenciones de mantenimiento oportunas [32].



Figura 7.14 Sensor de desgaste de revestimiento interno.

Este sistema presenta un costo inicial más elevado, ya que la integración del sensor de desgaste junto con el revestimiento interno especial incrementa el precio de la tubería en un 40% en comparación con las opciones convencionales.

No obstante, una ventaja clave de esta tecnología es la posibilidad de reemplazar únicamente el revestimiento cuando este se deteriora, evitando el cambio completo de la tubería. Esto permite realizar un proceso de recauchaje, cuyo costo equivale al 30% del valor original del ducto, lo que lo convierte en una alternativa potencialmente más rentable a largo plazo.

Para evaluar su efectividad y viabilidad operativa, se propone la instalación de este sistema como proyecto piloto en los 11 elementos críticos identificados.

7.8.2 Método de memoria magnética LSM

El método de memoria magnética (LSM) es una tecnología de inspección que permite analizar y verificar las tensiones residuales en tuberías a través del electromagnetismo generado por las propias líneas de conducción [25].



Figura 7.15 Método de memoria magnética LSM.

Una de sus principales ventajas es que no requiere contacto directo con la tubería, lo que lo hace especialmente adecuado para la inspección de tuberías soterradas. Esto lo convierte en una opción

viable para la zona de estudio, especialmente considerando que el sistema de protección catódica aún no ha sido instalado.

La recomendación de implementar este método se fundamenta en un reciente evento de rotura de una línea soterrada, el cual tuvo un impacto significativo en el proceso y generó un considerable gasto de recursos para llevar a cabo la reparación. Ante esta situación, la aplicación del método LSM permitiría detectar de manera anticipada posibles fallas estructurales, minimizando el riesgo de eventos similares en el futuro.

Se propone utilizar este sistema como un servicio de evaluación periódica cada 3 años, con el objetivo de monitorear el estado estructural de las tuberías, detectar anomalías en las tensiones y determinar la necesidad de intervenciones preventivas.

7.8.3 Medición de campo de corriente alterna (ACFM)

El método de Medición de Campo de Corriente Alterna (ACFM) es una técnica avanzada de inspección no destructiva que permite detectar y caracterizar fisuras en tuberías sin necesidad de contacto directo con el material. Su funcionamiento se basa en la inducción de un campo electromagnético en la superficie del ducto y en la medición de las alteraciones provocadas por defectos o discontinuidades estructurales [26].



Figura 7.16 Equipo de medición de ACFM [26].

Este método no solo identifica grietas, sino que también permite evaluar su severidad y predecir su evolución, lo que facilita una planificación eficiente de los recambios y prioriza intervenciones en función del nivel de daño, evitando reemplazos innecesarios. Al monitorear el crecimiento de las fisuras, es posible ajustar las estrategias de mantenimiento, optimizar los tiempos de inspección y prolongar la vida útil de los ductos. Su aplicación en tuberías permite realizar inspecciones sin afectar la operación, reduciendo costos asociados a detenciones imprevistas. Además, proporciona un enfoque predictivo más preciso, mejorando la confiabilidad y disponibilidad del sistema de conducción de fluidos.

Se propone la adquisición del equipo de inspección ACFM y la capacitación del personal para su uso, con el objetivo de mejorar la evaluación de defectos en las tuberías de proceso. Al contar con esta capacidad internamente, se podrán realizar inspecciones periódicas sin depender de servicios externos, reduciendo costos a largo plazo y permitiendo un monitoreo continuo del estado de las tuberías.

7.8.4 Método de ultrasonido de onda guiada

El método de ultrasonido de onda guiada es una técnica avanzada de inspección no destructiva que permite detectar corrosión, fisuras y otros defectos estructurales en tuberías a lo largo de grandes distancias, con un mínimo de puntos de acceso. Su funcionamiento se basa en la propagación de ondas ultrasónicas a través de la pared de la tubería, las cuales interactúan con discontinuidades en el material, reflejando señales que pueden ser analizadas para determinar la presencia, severidad y ubicación de daños [24].



Figura 7.17 Método de ultrasonido de onda guiada.

Este método es especialmente útil para la inspección de tuberías soterradas, aéreas y recubiertas, ya que permite evaluar su estado sin necesidad de retirar aislamientos o exponer grandes secciones de la tubería.

El reciente evento de rotura en las líneas soterradas evidenció la necesidad de contar con tecnologías de monitoreo preventivo más eficaces. Actualmente, la inspección de estas líneas se realiza mediante calicatas o excavaciones en puntos específicos a lo largo del tramo soterrado, lo que limita la capacidad de evaluación y genera costos adicionales. La implementación del ultrasonido de onda guiada permitiría verificar el estado de las secciones no expuestas de la tubería, detectando posibles defectos sin la necesidad de intervenciones invasivas y permitiendo tomar acciones correctivas de manera oportuna.

CAPÍTULO 8: Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusión

El desarrollo del modelo de gestión de mantenimiento para las tuberías de proceso en la planta concentradora de Minera Candelaria permitió establecer un enfoque estructurado y eficiente para la optimización de la confiabilidad y disponibilidad de estos activos. A lo largo de este estudio, se logró analizar el contexto actual del mantenimiento, identificando y jerarquizando los activos en función de escalas previamente definidas, lo que permitió priorizar aquellos de mayor criticidad.

Uno de los principales logros del modelo fue la creación de un sistema de selección y comparación de estrategias de mantenimiento, asegurando que estas sean factibles dentro de los recursos y capacidades de la organización. Asimismo, se estableció una planificación optimizada de las actividades de mantenimiento, programándolas en periodos que minimicen el impacto en la producción.

En la implementación del caso piloto en el área de relaves, se logró establecer una estrategia enfocada en la criticidad de los activos, priorizando la prevención de fallas y la generación de un historial que facilite futuras reevaluaciones y optimización de estrategias. Se definieron actividades concretas, sus frecuencias de ejecución y los procedimientos para la gestión del recambio de elementos y su mantenimiento, contribuyendo así a una operación más confiable y eficiente.

Como resultado general, este modelo se presenta como una herramienta fundamental para mejorar la gestión del mantenimiento de las tuberías de proceso en la planta concentradora, asegurando su operatividad y prolongando su vida útil, lo que a su vez impacta positivamente en la continuidad operacional y en la productividad global.

8.2 Recomendaciones

1. **Implementación progresiva del modelo en otras áreas:** Se recomienda extender la aplicación del modelo a otras áreas de la planta concentradora, adaptándolo a las particularidades de cada sistema de tuberías. La implementación gradual permitirá evaluar su desempeño y realizar ajustes según las necesidades operativas.
2. **Integración de un especialista en integridad de ductos:** Se recomienda la incorporación de un especialista en integridad de ductos, cuya función principal sea supervisar la aplicación del modelo, optimizar estrategias de mantenimiento y proponer mejoras en tecnologías, diseño y gestión de las tuberías de la planta.
3. **Uso de tecnologías avanzadas para inspección y monitoreo:** La adopción de tecnologías como sensores de monitoreo en línea o análisis predictivo mediante inteligencia artificial, esto puede mejorar significativamente la detección temprana de fallas y optimizar la planificación del mantenimiento.

Con estas recomendaciones, se busca asegurar la sostenibilidad del modelo de gestión de mantenimiento, promoviendo una cultura de mejora continua que contribuya a la eficiencia y confiabilidad de las tuberías en la planta concentradora de Minera Candelaria.

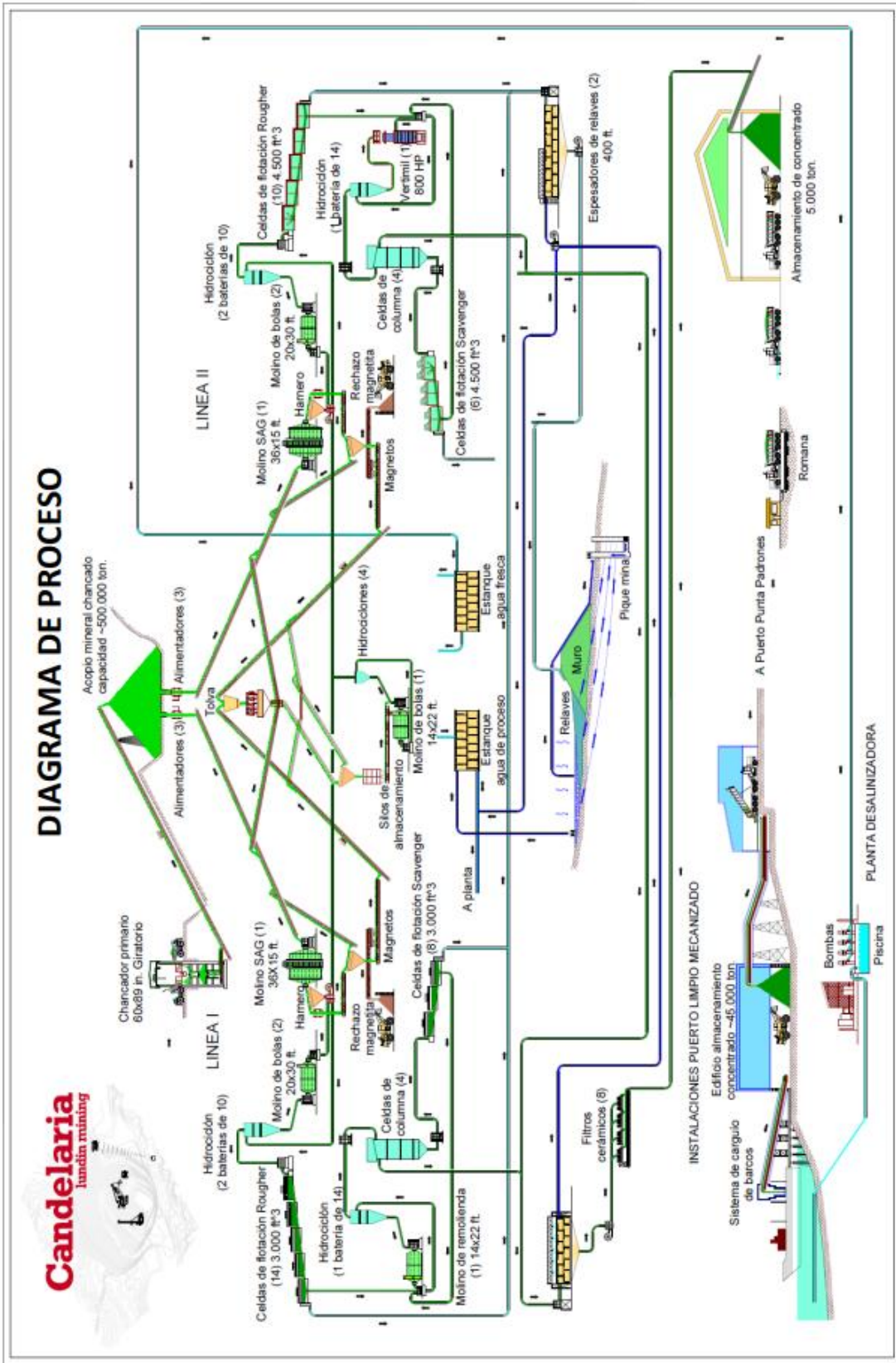
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Chilena del Cobre, «ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA ACTIVIDAD,» 2022.
- [2] Lundin Mining Corporation, "Technical Report for the Candelaria Copper Mining Complex, Atacama Región, Región III, Chile," SRK Consulting, 2023.
- [3] C. Sundararajan, Guide to reliability, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [4] z. P. N. K. D. H. S. R. R. K. M. G. Mohsen Moghimi dehkordi, «Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods,» *ELSEVIER*, p. 102729, 2024.

- [5] J. Moubray, *Mantenimiento centrado en confiabilidad*, Asheville: Aladon LLC, 2004.
- [6] A. M. Gutiérrez, *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*, México: ALFAOMEGA GRUP EDITOR S.A., 2009.
- [7] F. A. P. Rondón, *Conceptos Generales en la Gestión del mantenimiento*, Bucaramanga (Colombia): Universidad Santo Tomás, 2021.
- [8] SAP, «Acerca de SAP,» [En línea]. Available: <https://www.sap.com/latinamerica/about/what-is-sap.html>. [Último acceso: 03 10 2024].
- [9] S. G. Gonzáles, *Control de calidad en fabricación mecánica*, Artes Gráficas Jurado, SL, 2007.
- [10] L. Mora, *Mantenimiento, Planeación, Ejecución y Control*, Alfaomega Grupo Editor, 2009.
- [11] J. D. Campbell, *Strategies for Excellence in Maintenance Management*, 2016.
- [12] American Petroleum Institute, *API 570: Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair and Alteration of Piping Systems*, American Petroleum Institute, 2016.
- [13] American Society of Mechanical Engineers, *ASME B31.3-2010: Tuberías de proceso*, American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- [14] O. I. d. Normalización, Artist, *ISO 55000:2024 Gestión de activos*. [Art]. Organización Internacional de Normalización, 2024.
- [15] O. I. d. Normalización, Artist, *ISO 55001:2024 Gestión de activos*. [Art]. Organización Internacional de Normalización, 2024.
- [16] American Society of Mechanical Engineers, *ASME B31G-2012: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines*, American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [17] L. S. A. C. V. G.-P. P. V. Carlos Parra, «Modelo de gestión de mantenimiento y de confiabilidad alineado con la gestión de activos. Caso: mina de hierro,» *ResearchGate*, 2021.
- [18] K. c. E. Mamani, Artist, *Aplicación de metodología AMEF para optimizar el mantenimiento preventivo y predictivo del minero ducto de concentrado de mineral al norte del Perú*. [Art]. Universidad Católica de Santa María, 2020.
- [19] J. Acuña y B. Herrera, Artists, *Inspección de tuberías de descarga de concentrado de cobre de 22" por medio de un equipo de ultrasonido*. [Art]. Universidad Católica de Santa María, 2014.
- [20] M. Xie y Z. Tian, «Risk-based pipeline re-assessment optimization considering corrosion defects,» *ScienceDirect*, vol. 38, pp. 746 - 757, 2018.

- [21] DEEP TREKKER, «DEEP TREKKER,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.deeptrekker.com/cl/products/cctv-pipe-crawlers>.
- [22] E. E. Gdoutos, *Experimental Mechanics: An introduction*, Athens: The Springer, 2022.
- [23] J. C. F. Barra, Artist, *ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS MEDIANTE*. [Art]. Universidad del Bío Bío, 2013.
- [24] X. Z. Z. D. X. Q. a. S. Feng Lyu, «Application Research of Ultrasonic-Guided Wave Technology in Pipeline Corrosion Defect Detection: A Review,» *MDPI*, vol. 14, n° 358, 2024.
- [25] Morken Group, «Resumen Relevamiento mediante técnica LSM-MMM,» Copiapó, 2022.
- [26] P. L. Fernández, Artist, *Nuevas técnicas en ensayos no destructivo: ACFM*. [Art]. Álava ingenieros, 2007.
- [27] A. Zavarce, Artist, *Fundamentos y aplicaciones de la Emisión Acústica (EA)*. [Art]. INSPENET, 2021.
- [28] G. B. RIOS, Artist, *ANALISIS DE FALLAS EN EQUIPOS*. [Art]. Universidad de Concepción, 2023.
- [29] Weir Minerals, «Weir Minerals,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.global.weir/globalassets/resources/product-pdfs/linatex/linatex-rubber/WMD1745-linatex-rubber-products-brochure-20230421.pdf>. [Último acceso: 2025 1 23].
- [30] B. A. M. & R. J. P. Roch J. Shipley, «Introduction to Failure Analysis and Prevention,» *Springer Link*, vol. 22, pp. 9 -41, 2022.
- [31] R. L. R. F. J. ALKJANDRK SANCHKZ, Artist, *Causes and effects of the corrosion of a plumbing*. [Art]. Dpto. Construcciones Arquitectónicas II, K.U.A.T. de Sevilla, 2002.
- [32] Weir Minerals, 2023. [En línea]. Available: <https://www.global.weir/es/services/digital-services/NEXT-intelligent-solutions/NEXT-hoses-and-spools/>.

Anexo A: Diagrama de proceso planta concentradora de cobre minera Candelaria



Anexo B: Elementos del sistema de tuberías del área de relave

Sub-área	Ubicación	Tipo de elemento	Elemento	Cantidad	Características
Enlace hidráulico	TSF 1	Tuberías	Spools recto	122	Acero ASTM A53 Gr, B Sch. STD
			Spools lateral		
			Spools codo		Diámetros de Ø24", Ø20", Ø18" y Ø16"
			Spools codo		
			Spools Tee		
		Spools reducción	Revestimiento interno de poliuretano		
		Válvulas	Válvula Clarkson	14	Modelo KGA de Ø24"
		Uniones	Flanges	-	Slip On clase 300
	Unión		-	Unión Vitaulic	
	TSF 2	Tuberías	Spools recto	122	Acero ASTM A53 Gr, B Sch. STD
			Spools lateral		
			Spools codo		Diámetros de Ø22", Ø18" y Ø16"
			Spools codo		
			Spools Tee		
Spools reducción		Revestimiento interno de poliuretano			
Válvulas		Válvula DSS	12	Tipo cuchilla de Ø22"	
Uniones		Flanges	-	Slip On clase 300	
	Unión	-	Unión Vitaulic		

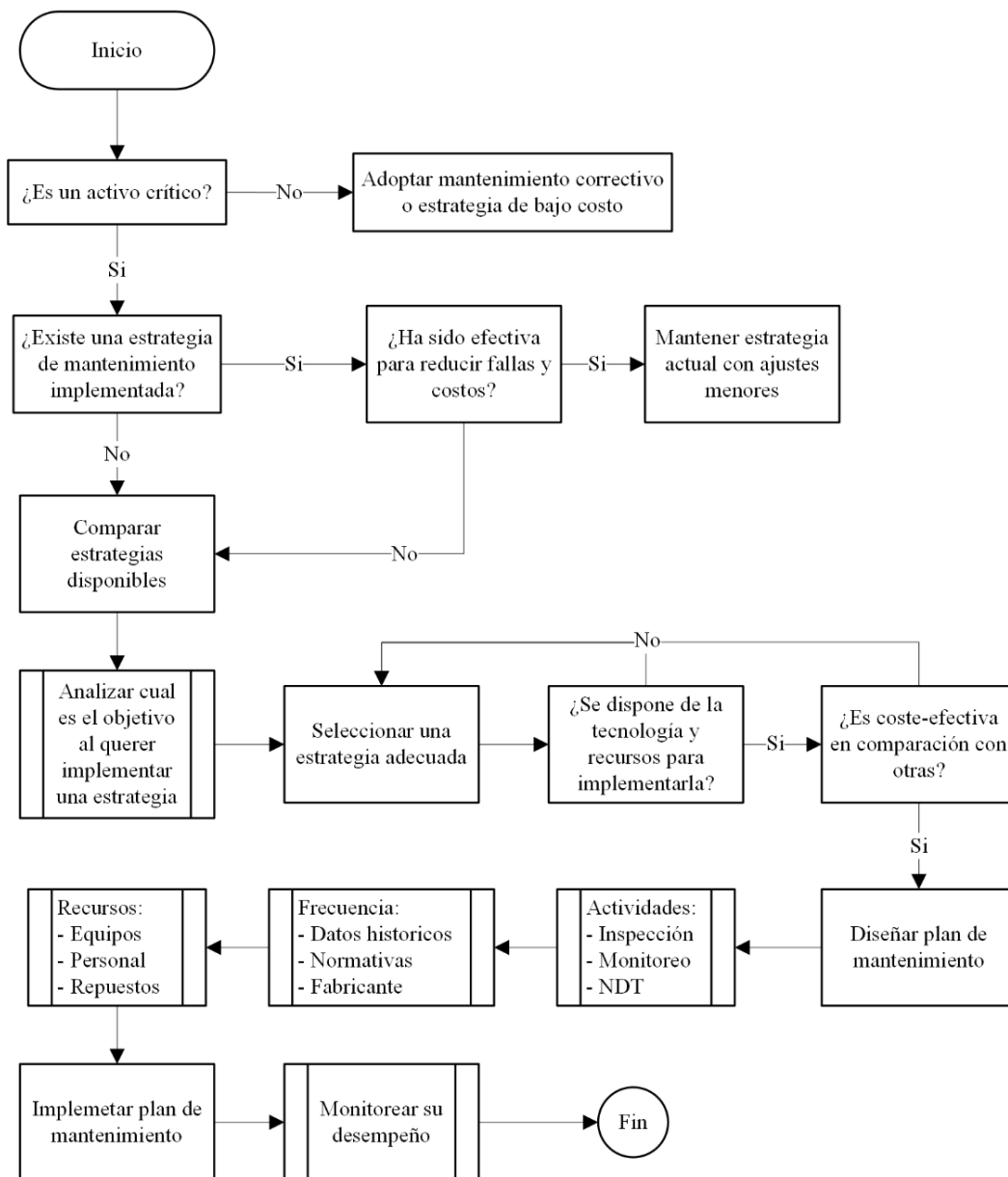
Sub- área	Ubicación	Tipo de elemento	Elemento	Cantidad	Características	
Área 620	Succión trenes de bombas	Tuberías	Spools recto	105	Acero ASTM A53 Gr, B Sch. STD	
			Spools lateral			
			Spools codo		Diámetros de Ø24", Ø22" y Ø16"	
			Spools codo			
			Spools Tee			Revestimiento interno de poliuretano
			Spools reducción			
		Válvulas	Válvula Clarkson	4	Modelo KGA de Ø24"	
				16	Modelo KGA de Ø16"	
	Uniones	Flange	-	Slip On clase 150		
			Unión	-	Unión Vitaulic clase 77	
	Entre trenes de bombas	Tuberías	Spools unión Dresser	24	Acero ASTM A53 Gr, B Sch. STD	
					Diámetro de Ø20"	
			Sin revestimiento			
			Acero ASTM A53 Gr, B Sch. STD			
		Spools reducción	Diámetro de Ø20" a Ø16"			
	Revestimiento interno de poliuretano					
	Uniones	Flange	-	Slip On clase 150		
	Descarga trenes de bombas	Tuberías	Spools recto	58	Acero ASTM A53 Gr, B Sch. STD	
			Spools lateral			
			Spools codo		Diámetros de Ø24", Ø22" y Ø16"	
			Spools codo			
			Spools Tee			Revestimiento interno de poliuretano
			Spools reducción			
Válvulas		Válvula DSS	2	Válvula tipo cuchilla de Ø22"		
		Válvula DeZurick	12	Válvula de tapón excéntrico de Ø24"		
Uniones	Flange	-	Slip On clase 300			
Tuberías soterradas	Tuberías	-	-	Acero API 5L X52 de Ø20"		
		-	-	Extensión de 1.8 km		

Anexo C: Análisis de modo de falla y efectos

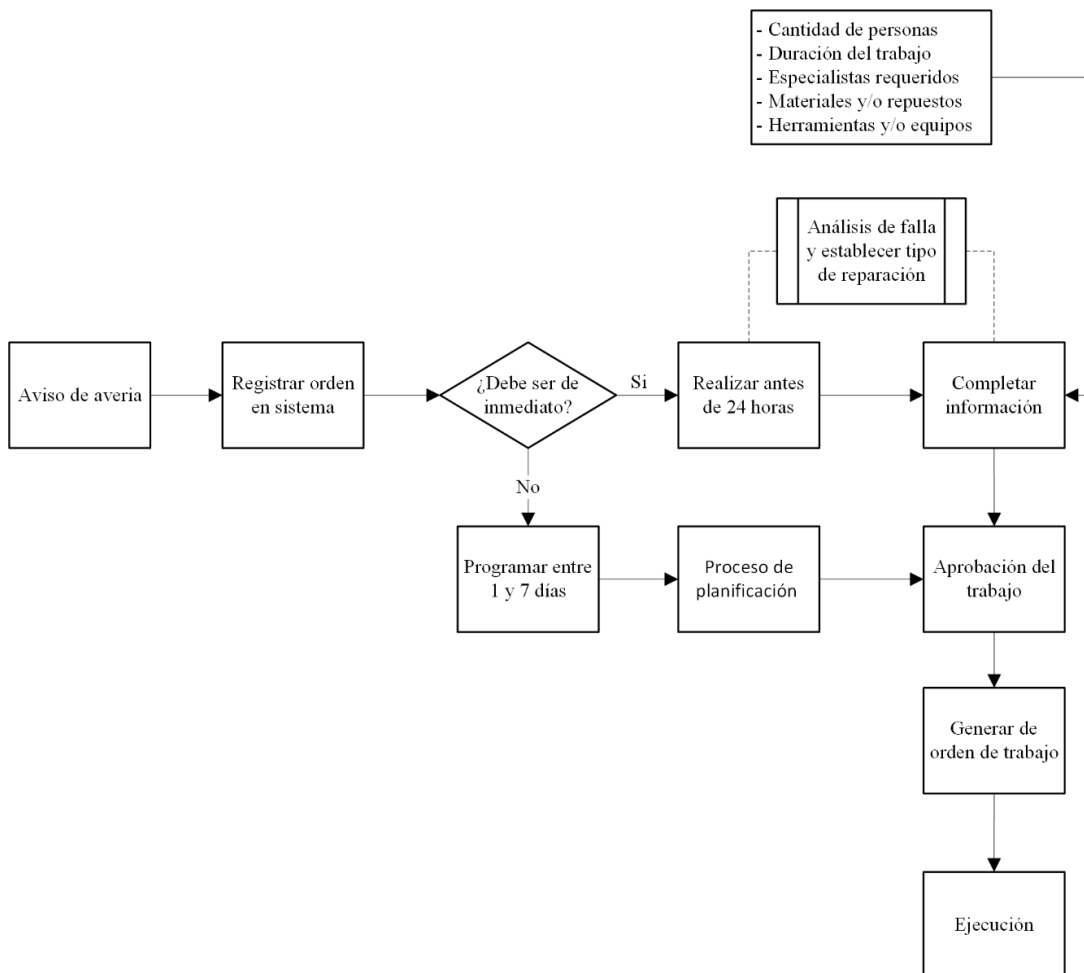
Tabla XX. FMEA para elementos de tuberías relave.

Nº	Componente / Equipo	Función	Falla			
			Modo de falla	Causa	Efectos	Medidas de control
1	Tubería de relave	Transporte y distribución de relave hasta tranque	Rotura	Golpes de ariete	1.- Liberación de fluido al exterior 2.- Contaminación del suelo 3.- Detención del proceso	1.- Uso de tren de emergencia 2.- Cambio de elemento 3.- Instalación de abrazadera temporal 4.- Instalación de Sleeves tipo A o B
				Fatiga térmica o estructural		
				Corrosión externa/interna		
			Fuga	Golpes de ariete	1.- Contaminación del suelo 2.- Pérdida de fluido	1.- Uso de tren de emergencia 2.- Apriete de unión 3.- Reemplazo de unión 4.- Instalación de Sleeves o abrazadera
				Fatiga térmica o estructural		
				Mal apriete de pernos		
Embancamiento	Falta de floculante	1.- Detención del tren 2.- Acumulación de carga	1.- Lavado de línea 2.- Cambio de tren			
	No vaciado de línea					
2	Válvula	Control de flujo de relave y cambio de tren	Filtración interna	Desgaste de cuerpo	1.- Acumulación de carga en tren 2.- Embancamiento	1.- Uso de tren de emergencia 2.- Cambio de válvula
				Desgaste de elemento de cierre		
				Cierre incompleto		
			Filtración externa	Desgaste de sellos	1.- Contaminación del suelo 2.- Pérdida de fluido	1.- Uso de tren de emergencia 2.- Apriete de sellos 3.- Cambio de válvula
				Desgaste de cuerpo		
				Falta de apriete en sellos		
No accionamiento	Obstrucción paso del elemento de cierre	1.- Acumulación de carga en tren 2.- Embancamiento 3.- Detención del tren 4.- Contaminación de suelo	1.- Uso de tren de emergencia 2.- Limpieza y lubricación 3.- Reparación sistema de accionamiento			
	Fugas en sistema de accionamiento					

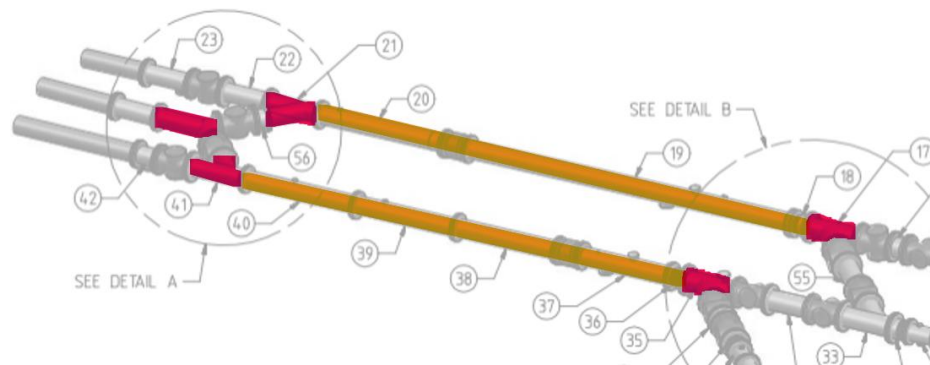
Anexo D: Diagrama de selección de estrategia de mantenimiento



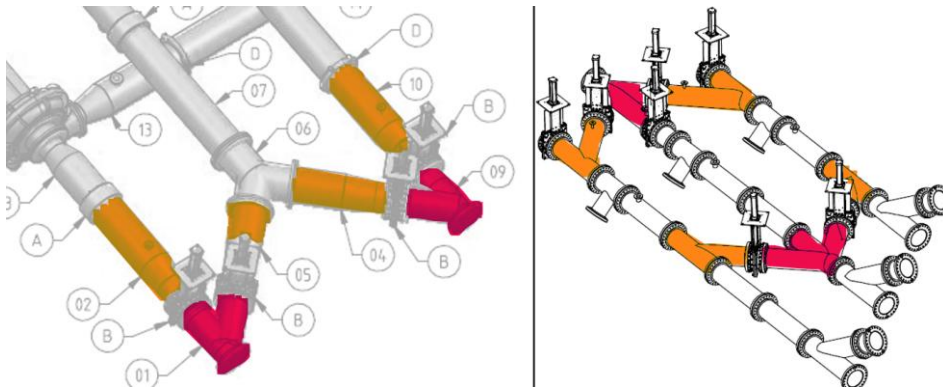
Anexo E: Diagrama de selección de estrategia de mantenimiento



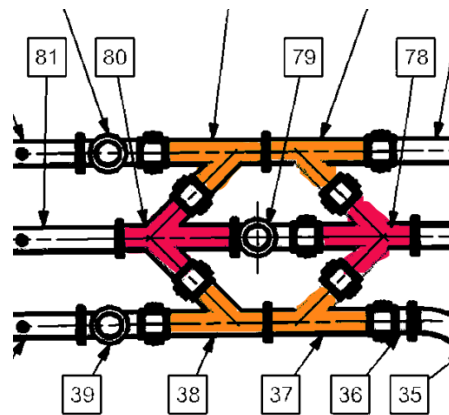
Anexo F: Mapas de calor de tuberías críticas según jerarquización



Tuberías de descarga área 620



Tuberías TSF 1



Tuberías TSF 2

Anexo G: Actividades de mantenimiento sistemas de tuberías relave

Sub-área	Actividad	Tren	Frecuencia
Área 620	Inspección televisiva	Tren B	52 semanas
		Tren C	
	Medición de espesor unión Dresser	Tren A	26 semanas
		Tren B	
Tren C			
TSF 1	Inspección termográfica	Tren 1	6 semanas
		Tren 2	
		Tren emergencia	
	Inspección visual	Tren 1	2 semanas
		Tren 2	
		Tren emergencia	
TSF 2	Medición de espesor tuberías	Tren 1	52 semanas
		Tren 2	
		Tren emergencia	
	Inspección termográfica	Tren 1	6 semanas
		Tren 2	
		Tren emergencia	

Anexo H: Proceso de mejora continua

