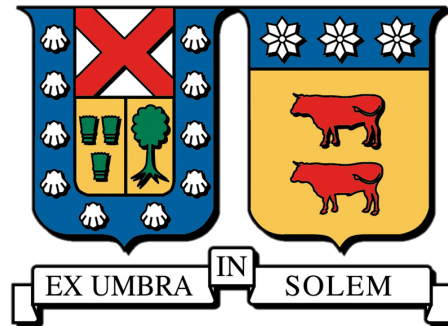


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO, CHILE



**ESTUDIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA
BOMBAS SUMERGIBLES DE AGUA POTABLE EN
PLANTAS DE SERVICIOS DE DISTRIBUCIÓN DE
COMBUSTIBLES EN CHILE EN BASE AL MODELO DE
GESTIÓN DE MANTENIMIENTO E INCORPORANDO
HERRAMIENTAS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

FERNANDA DE JESÚS GUARDIA OLGUÍN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

PROFESOR GUÍA: MG.ING. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER
PROFESOR CORREFERENTE: DR.ING. PEDRO SARIEGO PASTÉN

ENERO, 2024

Agradecimientos

A lo largo de estos seis años de carrera, he tenido el privilegio de contar con el apoyo de muchas personas que me han acompañado y ayudado en diferentes etapas de este desafiante pero gratificante camino. Este espacio está dedicado a agradecerles sinceramente por todo lo que han hecho por mí.

Primero, quiero expresar mi profunda gratitud a mis padres, Carola Olguín y César Guardia. Desde el momento en que decidí comenzar en este desafío de estudiar Ingeniería Civil Mecánica en la Universidad Técnica Federico Santa María, ustedes han estado incondicionalmente a mi lado, apoyando cada decisión que he tomado. Su confianza y respaldo han sido mi mayor motivación para seguir adelante.

Agradezco también a mis profesores René Valdenegro y Pedro Sariego, quienes, además de impartir sus conocimientos en los cursos que tuve el honor de cursar con ellos, estuvieron siempre dispuestos a resolver mis dudas y a aportarme con su visión industrial. Gracias a ustedes, he logrado consolidar mis conocimientos y crecer profesionalmente.

De igual manera, quiero agradecer profundamente a Felipe Bahamondes por darme la oportunidad de realizar este trabajo en la Subgerencia de Mantenimiento de Copec. Su calidez como mentor y su disposición constante para enseñar me han marcado tanto en lo laboral como en lo personal. Su guía y apoyo han sido fundamentales para completar este trabajo. Agradezco también a Eric Sabino por tu buena disposición y por la paciencia con la que respondiste todas mis dudas. También extendiendo mi gratitud a la Subgerencia de Mantenimiento de Copec por brindarme un ambiente cálido y acogedor durante mi periodo como practicante y memorista.

A mi mejor amiga, Monserrat Mora, gracias por ser una fuente constante de inspiración. Tu apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi vida ha sido invaluable. Gracias por siempre estar a mi lado, recordándome la importancia de seguir adelante.

Finalmente, quiero agradecer a todos los amigos que he hecho durante mi tiempo en la universidad. Juntos hemos reído, llorado y superado innumerables desafíos. Gracias por sus palabras de aliento, por sus conversaciones y por compartir este camino conmigo. Un agradecimiento especial para Joaquín Schiesewitz y Sebastián Zagal, quienes han estado conmigo desde el primer año. Pase lo que pase, nuestra amistad ha permanecido intacta, y por ello les estoy profundamente agradecida.

Dedicatoria

A mis padres, Carola Olguín y César Guardia, por su amor, su confianza y por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino. Este logro también es suyo.

A mí misma, por no rendirme y por llegar hasta aquí

A mi querido tata Olguín, quien no está aquí físicamente, pero sé que me acompaña desde donde esté. Estoy segura de que estaría orgulloso de ver a su nieta ingeniera.

Resumen

El presente trabajo aborda la gestión del mantenimiento predictivo en bombas sumergibles de agua potable utilizadas en las estaciones de servicio de Copec, con el propósito de optimizar la confiabilidad operativa y reducir los costos asociados a fallas imprevistas. Copec, líder en el sector energético en Chile, cuenta con más de 685 estaciones de servicio distribuidas en el país, donde solo una parte de estas cuenta con sistema de pozo para agua potable (52 EDS) operando bajo un modelo de mantenimiento predominantemente correctivo, lo que genera altos costos y tiempos de inactividad.

El objetivo principal de esta memoria es diseñar un plan de mantenimiento basado en un modelo de gestión estructurado en ocho etapas, busca justificar la oportunidad de mejora encontrada e integrando herramientas tecnológicas avanzadas, como la inteligencia artificial (IA) y sistemas de telemetría. Este modelo permite la identificación temprana de fallas mediante el análisis de datos operativos como caudal, potencia y vibración, proporcionando una solución teórica para predecir problemas antes de que ocurran.

La metodología se centra en evaluar el estado actual del mantenimiento, identificar los equipos críticos y sus fallas potenciales mediante matrices de criticidad y análisis RCM (Reliability-Centered Maintenance). A partir de estos diagnósticos, se propone un plan predictivo que incluye la programación, ejecución y control de actividades, con énfasis en la sostenibilidad y la eficiencia.

Durante el análisis se identificó que, en promedio, una estación de servicio afectada por fallas en sus bombas sumergibles experimenta 20 horas de inactividad, aproximadamente, lo que genera pérdidas económicas considerables. Con la implementación del plan de mantenimiento predictivo, estas pérdidas podrían reducirse en un 73 % frente al modelo correctivo actual. Además, se estiman beneficios adicionales como la mejora en la satisfacción del cliente y la alineación con los objetivos estratégicos de la empresa. Este trabajo enfatiza la importancia de la integración de tecnologías emergentes en la gestión del mantenimiento, sentando las bases para futuras implementaciones prácticas en sectores industriales.

Abstract

This study addresses the management of predictive maintenance for submersible water pumps used in Copec's service stations, aiming to optimize operational reliability and reduce costs associated with unexpected failures. Copec, a leader in the energy sector in Chile, operates over 685 service stations nationwide, of which only 52 have a portable water well system. These stations currently rely on a predominantly corrective maintenance model, resulting in high costs and significant downtime.

The main objective of this study is to design a maintenance plan based on a management model structured in eight stages, aimed at justifying the identified opportunity for improvement and integrating advanced technological tools such as artificial intelligence (AI) and telemetry systems. This model enables early fault detection by analyzing operational data such as flow rate, power, and vibration, providing a theoretical solution to predict problems before they occur.

The methodology focuses on evaluating the current state of maintenance, identifying critical equipment and its potential failures through criticality matrices and Reliability-Centered Maintenance (RCM) analysis. Based on these diagnostics, a predictive plan is proposed that includes scheduling, execution, and activity control, with an emphasis on sustainability and efficiency.

During the analysis, it was identified that, on average, a service station affected by failures in its submersible pumps experiences approximately 20 hours of downtime, resulting in significant economic losses. By implementing the predictive maintenance plan, these losses could be reduced by 73 % compared to the current corrective model. Additional benefits include improved customer satisfaction and alignment with the company's strategic objectives. This study highlights the importance of integrating emerging technologies into maintenance management, laying the groundwork for future practical implementations in industrial sectors.

Nomenclatura

EDS: Estaciones de Servicio.

IMO: Ingeniero de Mantenimiento Operacional.

B2C: Business to Consumer.

B2B: Business to Business.

HSEC: Health, Safety, Environment, and Community.

RCM: Reliability-Centered Maintenance. (Mantenimiento Centrado Confiabilidad)

MTBF: Mean Time Between Failures (Tiempo medio entre fallos)

MTTR: Mean Time to Repair (Tiempo medio de reparación)

IA: Inteligencia Artificial.

ML: Machine Learning (Aprendizaje automático).

LoRa: Largo alcance.

KPIs: Indicador clave de rendimiento

Índice

Agradecimientos	I
Dedicatoria	II
Resumen	III
Abstract	IV
Nomenclatura	V
Índice de figuras	IX
Índice de figuras	X
Índice de cuadros	1
Índice de tablas	1
1 Introducción	2
1.1 Contexto y motivación.....	2
1.2 Identificación de la Oportunidad de Mejora.....	3
2 Objetivos	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 Estado del arte	5
3.1 Inteligencia Artificial.....	5
3.1.1 Conceptos Básicos de IA y ML	5
3.1.2 Relación entre IA y ML en el Mantenimiento Industrial	5
3.1.3 Beneficios en el Mantenimiento Predictivo	6
3.2 Telemetría	6
3.2.1 Aplicaciones Generales de la Telemetría	6
3.2.2 Componentes y Funcionamiento.....	6
3.2.3 Beneficios de la Telemetría.....	7
3.2.4 Telemetría e Inteligencia Artificial	7

4	Metodología y Herramientas a utilizar	8
4.1	Modelo de Gestión del Mantenimiento	8
4.2	Herramientas a utilizar	9
4.2.1	Las 6M	10
4.2.2	Matriz de Criticidad Cualitativa-Cuantitativa	10
4.2.3	RCM (Reliability-Centered Maintenance)	11
4.2.4	Ventajas del RCM frente a otras herramientas	12
5	Marco teórico	14
5.1	Mantenimiento	14
5.1.1	Mantenimiento Correctivo	14
5.1.2	Mantenimiento Preventivo	14
5.1.3	Mantenimiento Predictivo	14
5.2	Ingeniería de Mantenimiento	15
5.3	Confiabilidad	15
5.4	Disponibilidad	15
5.5	Utilización	16
5.6	Mantenibilidad	16
5.7	Eficiencia	16
5.8	Tiempo Medio entre Fallos	16
5.9	Tiempo Medio de Reparación	17
5.10	Impacto operacional	17
5.11	Indicadores de desempeño (KPIs)	18
5.12	Gestión	18
5.13	Activo	18
6	Desarrollo del Modelo de Gestión del Mantenimiento	19
6.1	Etapa 1: Establecer propósitos de la empresa.....	20
6.1.1	Misión, Visión y Objetivos.....	20
6.1.2	Áreas operativas de la empresa.....	21
6.1.3	Organigrama de la empresa.....	22
6.1.4	Subgerencia de Mantenimiento	23
6.1.5	Foco de análisis	25
6.2	Etapa 2: Análisis de la situación actual del mantenimiento.....	26
6.2.1	Enfoque Proceso de Agua Potable	27
6.2.2	Análisis Interno	30
6.2.3	Rendimiento Actual del Sistema.....	31
6.2.4	Identificación de Brechas.....	32
6.3	Etapa 3: Jerarquización de Equipos	32
6.3.1	Matriz de Criticidad.....	33
6.4	Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipo de alto impacto.....	36
6.4.1	Equipo Crítico	36
6.4.2	Evaluación e Utilización de la Herramienta RCM.....	39
6.5	Etapa 5: Diseño del plan de mantenimiento y recursos necesarios	52
6.5.1	Creación del Programa de IA.....	53

6.5.2	Aviso de Falla	56
6.5.3	Evaluación y Retroalimentación	57
6.6	Etapa 6: Programación, Ejecución, Evaluación y Control de la ejecución del mantenimiento y optimización de recursos	57
6.6.1	Programación detallada	57
6.6.2	Ejecución del Mantenimiento Predictivo	60
6.6.3	Evaluación y Control del Mantenimiento	61
6.7	Etapa 7: Ingeniería de Mantención	63
6.7.1	Evaluación de Resultados	63
6.7.2	Propuestas de Mejora	63
6.7.3	Estandarización de Procesos	65
6.7.4	Retroalimentación y Optimización	66
6.8	Etapa 8: Análisis del ciclo de vida del activo	67
6.8.1	Costos del Mantenimiento Correctivo Actual.....	67
6.8.2	Costos del Mantenimiento Predictivo Propuesto	70
6.8.3	Comparación de Costos	73
7	Recomendaciones	75
7.1	Estandarización de las Marcas y Modelos de Bombas Sumergibles	75
7.2	Estandarización de los Avisos de Fallas	75
7.3	Optimización de la Información en el Sistema SAP	76
7.4	Implementación Temporal de un Mantenimiento Preventivo	76
8	Conclusión	78
	Bibliografía	79
	Anexo A: Ficha Técnica Bomba Sumergible	81
	Anexo B: Mantenimiento Preventivo Equipos Sistema Agua. Check List	85
	Anexo C: Estudio Potencia en Bomba Sumergible con Telemetría	87

Índice de figuras

4.1	Modelo de Gestión del Mantenimiento en base a focos estratégicos. [11] ..	8
4.2	Matriz Genérica de Criticidad. [11].....	11
4.3	Ejemplo aplicación herramienta RCM. [11]	13
6.1	Modelo de Gestión del Mantenimiento con las etapas a utilizar. [11]	19
6.2	Estación de Servicio Copec. [12]	21
6.3	Estructura General Copec. [13]	22
6.4	Estructura Subgerencia Mantenimiento. [13]	24
6.5	Distribución EDS en Chile. [15]	26
6.6	Distribución geográfica de EDS con pozo profundo. [16].....	28
6.7	Diagrama del Proceso Agua Potable. Elaboración propia.....	29
6.8	Matriz de Criticidad 4x4. Elaboración propia	34
6.9	Bomba Sumergible Subline 150-6 acoplada a Motor Franklin. [19].....	37
6.10	Árbol de Decisiones RCM	51
6.11	Configuración Severidad Avisos. [29]	54
6.12	Caso Real EDS. [16]	55
6.13	Comportamiento potencia 5 meses previos a la falla. Elaboración propia.	56
6.14	Programación Modelo IA. Elaboración propia.	58
6.15	Programación Aviso Falla. Elaboración propia.....	59
6.16	Evaluación y retroalimentación. Elaboración propia.....	60
6.17	Flujograma Aviso Falla a Cambio de Bomba. Elaboración propia	61
6.18	Flujograma Evaluación. Elaboración propia	61
6.19	Flujo Proceso Completo. Elaboración propia.	62
6.20	Indisponibilidad EDS. Elaboración propia.	64
6.21	Detalle Bomba Sumergible. [19]	65
6.22	Ciclo Retroalimentación del Modelo. Elaboración propia.	66
6.23	Indisponibilidad EDS. Elaboración propia.	68
6.24	Costos Mantenimiento Actual	69
6.25	Proyección Costos por EDS Mantenimiento Actual	69
6.26	Proyección 10 años Mantenimiento Actual.....	70
6.27	Costos Plan Mantenimiento Propuesto.....	71
6.28	Proyección de Costos por EDS Propuesta de Mantenimiento	72
6.29	Proyección 10 años Mantenimiento Propuesto	72
6.30	Comparación ente el mantenimiento Actual y el Propuesto	73
1	Ficha técnica de la bomba sumergible (SP150).	81

2	Ficha técnica de la bomba sumergible - Continuación (SP150).....	82
3	Ficha técnica del motor acoplado (Franklin Electric).	83
4	Ficha técnica del motor acoplado - Continuación (Franklin Electric).	84
5	Check list de mantenimiento preventivo del sistema de agua.	85
6	Continuación Check List	86
7	Peak Potencia Bomba Sumergible	87

Índice de cuadros

6.1	Tiempo Medio de Reparación Equipos	31
6.2	Evaluación Criticidad Equipos Sistema de Agua Potable.....	35
6.3	Resumen Categoría Criticidad Equipos	35
6.4	Especificaciones Técnicas de la Bomba Sumergible	40
6.5	Especificación función primaria.....	40
6.6	Fallas funcionales asociadas ala función primaria de la bomba sumergible.	41
6.7	Modos de falla Función 1.1.....	42
6.8	Modos de falla Función 1.2.....	42
6.9	Modos de falla Función 1.3.....	43
6.10	Causas Raíz Función 1.1	44
6.11	Causa Raíz Función 1.2	45
6.12	Causas Raíz Función 1.3	45
6.13	Consecuencias de las Fallas	46
6.14	Soluciones Predictivas	50
6.15	Programación de la Creación del Modelo IA	58
6.16	Programación Aviso Falla	59
6.17	Programación Evaluación y Retroalimentación.....	59
6.18	Costos por falla. Bomba Sumergible.....	67

1. Introducción

1.1. Contexto y motivación

La gestión del mantenimiento es una disciplina esencial para garantizar la operación eficiente y segura de sistemas industriales. Su relevancia se magnifica en contextos donde la continuidad operativa es crucial, como en las estaciones de servicio de combustibles. Estos sistemas, altamente críticos, no solo sostienen el suministro energético, sino que también abarcan una serie de infraestructuras complementarias que aseguran el bienestar de los trabajadores y la satisfacción del cliente. Entre estas infraestructuras destacan las bombas sumergibles de agua potable, cuya función principal es garantizar un suministro continuo y seguro de agua tanto para el funcionamiento interno de la estación como para los servicios ofrecidos al público.

El mantenimiento adecuado de estas bombas no solo es necesario para evitar interrupciones operativas, sino también para cumplir con los estándares de calidad y seguridad exigidos en el sector. Una falla en el suministro de agua potable puede tener repercusiones significativas, desde la afectación directa de la experiencia del cliente hasta la interrupción de las operaciones críticas de la estación. Esto, a su vez, impacta la imagen de la empresa, disminuye la confianza de los usuarios y genera costos adicionales por reparaciones de emergencia.

En este contexto, garantizar un mantenimiento eficiente y oportuno no es únicamente una cuestión técnica, sino también estratégica. La transición hacia modelos de mantenimiento más avanzados, que permitan anticipar fallas y reducir el impacto operativo de estas, se convierte en una prioridad para las organizaciones que buscan optimizar recursos, minimizar costos y mantenerse competitivas en un mercado altamente exigente. La integración de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial, ha demostrado ser una herramienta valiosa para alcanzar estos objetivos, proporcionando capacidades predictivas que superan las limitaciones de los enfoques tradicionales.

Por lo tanto, comprender y optimizar la gestión del mantenimiento en sistemas críticos, como las bombas sumergibles, es esencial para el éxito operativo de las estaciones de servicio. Este estudio se desarrolla en un escenario donde la mejora continua y la innovación tecnológica no solo son deseables, sino necesarias para asegurar la sostenibilidad y el crecimiento en un sector que exige altos niveles de eficiencia y confiabilidad.

1.2. Identificación de la Oportunidad de Mejora

Coppec, una de las principales empresas del sector energético en Chile, opera una red de más de 685 estaciones de servicio distribuidas a lo largo del país. Estas estaciones no solo abastecen combustible, sino que también integran servicios complementarios que dependen de una infraestructura adecuada, incluyendo las bombas sumergibles de agua potable. Actualmente, el enfoque de mantenimiento adoptado por la empresa es predominantemente correctivo, lo que implica que las intervenciones solo se realizan tras la ocurrencia de una falla.

Este enfoque reactivo presenta limitaciones significativas. Las fallas inesperadas generan interrupciones en el suministro de agua, afectando la operatividad de las estaciones y la experiencia del cliente. Además, este modelo incrementa los costos operativos debido a reparaciones de emergencia y afecta la confiabilidad del sistema, generando riesgos adicionales para las operaciones diarias.

Teniendo en cuenta esto, ha identificado una oportunidad de mejora significativa: la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo que permita anticipar fallas en las bombas sumergibles y programar intervenciones de forma planificada. Se busca lograr un enfoque e las nuevas tecnologías, como lo es la IA, con los datos que la telemetría ofrece,

La integración de un modelo predictivo no solo busca reducir los costos operativos asociados al mantenimiento, sino también garantizar la continuidad operativa de las estaciones, mejorando la percepción del cliente y alineándose con los objetivos estratégicos de la empresa. Este cambio en la estrategia de mantenimiento representa un avance hacia la optimización de recursos, la sostenibilidad y la eficiencia.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar un plan de mantenimiento en base al modelo de gestión de mantenimiento para la predicción de fallas en bombas sumergibles de agua potable presentes en las estaciones de servicio de Copec, integrando el estudio de alternativas tecnológicas actuales, como la Inteligencia Artificial (IA), con el fin de optimizar la confiabilidad operacional.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar el contexto operacional y los requisitos del sistema de mantenimiento actual en las estaciones de servicio de Copec, enfocado en las bombas sumergibles de agua potable.
- Identificar y analizar los principales riesgos operativos asociados a las fallas de bombas sumergibles, evaluando su impacto en la eficiencia operativa y en la continuidad del servicio.
- Analizar y evaluar las variables de riesgo presentes en el sistema de suministro de agua potable en las estaciones de servicio.
- Evaluar y jerarquizar los riesgos.
- Investigar y evaluar las tecnologías actuales de predicción de fallas, como la IA, integradas teóricamente al modelo de mantenimiento.
- Aplicar el modelo de gestión de mantenimiento, para desarrollar un plan de mitigación de riesgos de falla en base al mantenimiento predictivo que incorpore herramientas tecnológicas.
- Identificar, destacar y evaluar los beneficios potenciales del modelo predictivo y el uso de la inteligencia artificial en términos de optimización de la eficiencia operativa, reducción de interrupciones y costos asociados.

3. Estado del arte

3.1. Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una herramienta revolucionaria en múltiples sectores, destacándose su impacto en el mantenimiento industrial debido a su capacidad de simular el aprendizaje, el razonamiento y la resolución de problemas, características propias de la inteligencia humana [28]. En este contexto, este trabajo no busca desarrollar un modelo de IA desde cero, sino implementar teóricamente esta tecnología en un plan de mantenimiento predictivo, considerando los beneficios que ofrece en términos de eficiencia y reducción de costos.

3.1.1. Conceptos Básicos de IA y ML

La IA puede clasificarse en enfoques como la IA simbólica y las redes neuronales artificiales. La IA simbólica se basa en reglas predefinidas, mientras que las redes neuronales simulan el funcionamiento del cerebro humano, aprendiendo patrones de los datos sin instrucciones explícitas. Esta última, junto con el Machine Learning (ML), permite que los sistemas analicen datos históricos para realizar predicciones y tomar decisiones informadas [27].

El libro *Analytics, Data Science, & Artificial Intelligence* describe cómo la IA puede clasificarse en tecnologías basadas en conocimiento, teorías de soporte y plataformas, entre otros. En el caso del mantenimiento, las tecnologías basadas en conocimiento y las plataformas de soporte han demostrado ser altamente relevantes, ya que permiten interpretar datos en tiempo real y proporcionar alertas proactivas [31]. Por ejemplo, los sistemas de ML entrenados con grandes volúmenes de datos pueden identificar patrones que anticipen fallas en equipos, lo que resulta clave para el mantenimiento predictivo [28].

3.1.2. Relación entre IA y ML en el Mantenimiento Industrial

El ML, una rama de la IA, se centra en el desarrollo de algoritmos que pueden aprender y mejorar con la experiencia. Esto es particularmente útil en el ámbito del mantenimiento, donde los datos obtenidos de sistemas de telemetría permiten entrenar modelos para detectar anomalías en equipos críticos. Herramientas como Python, ampliamente utilizadas en la implementación de algoritmos de ML, ofrecen bibliotecas especializadas que facilitan la integración de estas tecnologías en sistemas industriales existentes [33].

Por ejemplo, el libro *Machine Learning Yearning* de Andrew Ng resalta la importancia de establecer conjuntos de datos de desarrollo y prueba que representen fielmente las

condiciones operativas reales. Esto garantiza que los modelos sean robustos y efectivos en escenarios prácticos. Además, el análisis de errores y el ajuste de modelos en función de métricas específicas permiten mejorar continuamente su desempeño, haciendo que estas herramientas sean más precisas y confiables [32].

3.1.3. Beneficios en el Mantenimiento Predictivo

La implementación teórica de la IA en el mantenimiento industrial ofrece múltiples beneficios, como la identificación temprana de fallas, la optimización de recursos y la reducción de tiempos de inactividad. Los modelos basados en ML, al analizar variables como caudal, potencia y vibración de equipos, permiten predecir con antelación cuándo un equipo podría fallar. Esto facilita la planificación de intervenciones de mantenimiento antes de que se produzcan interrupciones críticas, mejorando la continuidad operativa y reduciendo costos indirectos [29].

3.2. Telemetría

La telemetría es una tecnología ampliamente utilizada en diversos campos industriales y sistemas complejos para el monitoreo y control de equipos y procesos. En esencia, se basa en la recopilación, transmisión y análisis de datos en tiempo real provenientes de sensores instalados en equipos o áreas críticas, lo que permite una toma de decisiones más informada y oportuna.

3.2.1. Aplicaciones Generales de la Telemetría

La telemetría encuentra aplicaciones en múltiples sectores, desde el monitoreo de sistemas de transporte y redes eléctricas hasta la gestión de maquinaria industrial y recursos naturales. Su flexibilidad radica en la capacidad de adaptar sensores específicos para medir variables como temperatura, presión, caudal, consumo eléctrico, entre otros, y enviar estos datos a plataformas centralizadas para su análisis. [29]

En el contexto de mantenimiento industrial, la telemetría permite monitorear de manera continua equipos clave, proporcionando información detallada sobre su estado operativo y detectando anomalías que puedan indicar la necesidad de intervención. Este enfoque mejora significativamente la eficiencia operativa y reduce el tiempo de inactividad no planificado.

3.2.2. Componentes y Funcionamiento

Un sistema típico de telemetría incluye:

- **Sensores:** Dispositivos que capturan datos específicos, como caudal, temperatura o vibraciones.
- **Módulos de transmisión:** Utilizan tecnologías como LoRa, WiFi o redes celulares para enviar los datos a servidores centralizados.
- **Plataformas de análisis:** Software que permite visualizar, analizar y generar alertas basadas en los datos recopilados.

Por ejemplo, en sistemas industriales, plataformas como *Clickie* son utilizadas para centralizar y analizar datos de telemetría, proporcionando reportes detallados y gráficos en tiempo real que permiten a los operadores identificar tendencias y tomar medidas correctivas oportunas.

3.2.3. Beneficios de la Telemetría

Los principales beneficios de implementar sistemas de telemetría son:

- **Monitoreo continuo:** Permite una supervisión constante de los equipos, identificando problemas en tiempo real.
- **Optimización del mantenimiento:** Facilita la planificación de mantenimientos preventivos y predictivos, reduciendo costos y tiempos de inactividad.
- **Toma de decisiones basada en datos:** Proporciona información confiable para la gestión eficiente de recursos y equipos.

3.2.4. Telemetría e Inteligencia Artificial

La integración de la telemetría con sistemas de inteligencia artificial (IA) representa un avance significativo en la gestión de equipos y procesos. Los datos obtenidos mediante telemetría son procesados por algoritmos de *Machine Learning* (ML), que identifican patrones complejos y emiten predicciones precisas sobre el comportamiento de los equipos. Esta combinación ofrece ventajas como:

- **Predicción de fallas:** La IA analiza datos históricos y en tiempo real para anticipar problemas antes de que ocurran.
- **Automatización del análisis:** Los algoritmos procesan grandes volúmenes de datos de forma eficiente, generando alertas y recomendaciones específicas.
- **Mejora operativa:** La interacción entre telemetría e IA permite optimizar procesos, reducir costos y maximizar la disponibilidad de los equipos.

4. Metodología y Herramientas a utilizar

4.1. Modelo de Gestión del Mantenimiento

El Modelo de Gestión del Mantenimiento constituye la base conceptual de este proyecto, proporcionando una guía estructurada y clara para desarrollar y optimizar las estrategias de mantenimiento. Este modelo se compone de ocho etapas fundamentales, con caminos alternativos que se adaptan según el estado del proyecto (en operación o en fase de diseño). Este enfoque flexible asegura que las estrategias implementadas se alineen con las necesidades específicas de cada contexto.

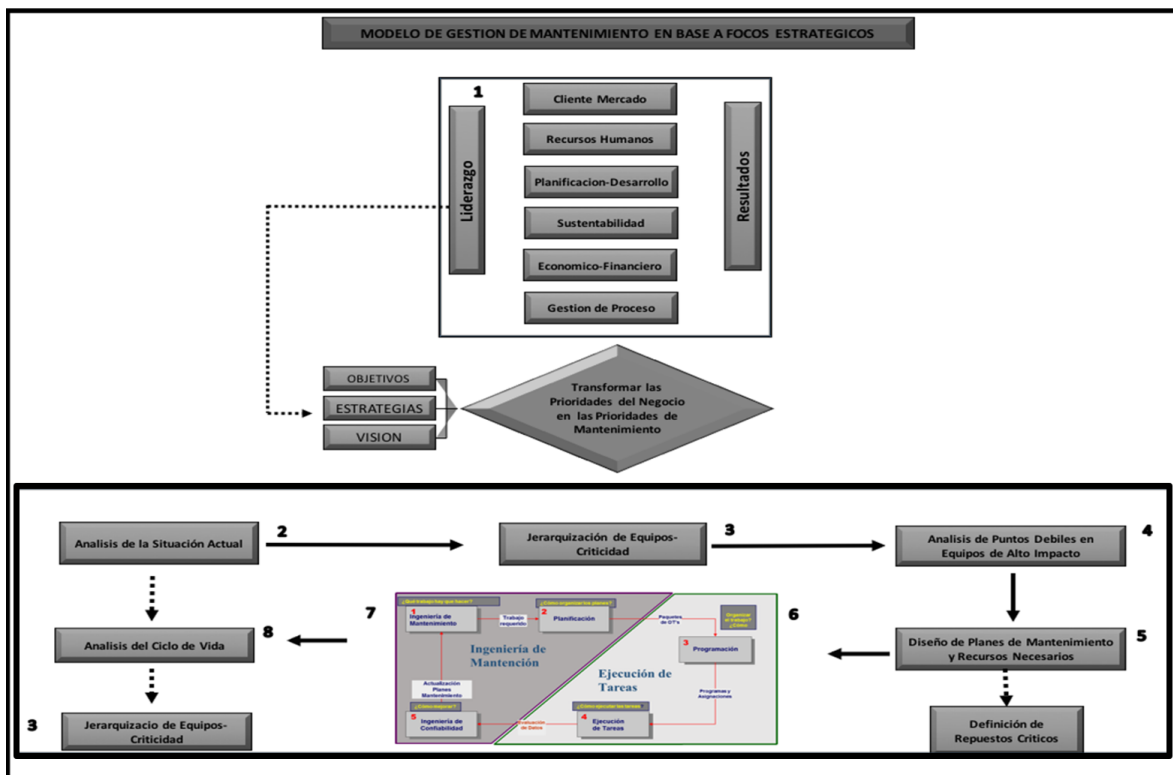


Figura 4.1: Modelo de Gestión del Mantenimiento en base a focos estratégicos. [11]

Estas etapas, crean una secuencia lógica para analizar cualquier proyecto, las cuales se definen brevemente a continuación:

- 1. Establecer los propósitos de la empresa:** Esta etapa inicial busca alinear los objetivos estratégicos de la empresa con la gestión de mantenimiento. Se define la visión, misión y valores, asegurando que las actividades de mantenimiento no

solo sean funcionales, sino que también contribuyan al desarrollo organizacional. Además, se establecen indicadores clave para medir el desempeño del sistema de mantenimiento.

2. **Análisis de la situación actual del mantenimiento:** Aquí se realiza un diagnóstico integral de las prácticas de mantenimiento existentes. Dependiendo del estado del proyecto, se pueden tomar dos caminos:
 - Si el proyecto ya está en funcionamiento, se analiza el historial de fallas, el estado de los equipos y los recursos disponibles.
 - Si el proyecto está en fase de diseño, se evalúan especificaciones técnicas, simulaciones de rendimiento y estrategias preventivas. Este análisis proporciona la información necesaria para avanzar hacia un mantenimiento eficiente y alineado con los objetivos estratégicos.
3. **Jerarquización de equipos críticos** En esta etapa se identifican los equipos que tienen mayor impacto en la operación. La jerarquización se realiza considerando factores como frecuencia de fallas, costos asociados y consecuencias operativas. Este paso es crucial para priorizar recursos y asegurar la continuidad operativa.
4. **Análisis de puntos débiles** También conocido como análisis de riesgos y fallas, se identifican las principales causas de falla de los equipos críticos. Se detectan los puntos vulnerables que afectan la confiabilidad del sistema.
5. **Diseño de planes de mantenimiento** En esta etapa se definen estrategias específicas para cada equipo: preventivo, predictivo o correctivo. El diseño incluye la planificación de recursos, la asignación de personal y el uso de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA) para la predicción de fallas.
6. **Programación, ejecución y control** Se elabora un cronograma detallado para la implementación del plan de mantenimiento. Esta etapa también incluye la supervisión de las actividades ejecutadas y el seguimiento de los indicadores de desempeño.
7. **Ingeniería de mantenimiento** Basándose en los resultados obtenidos, se proponen mejoras continuas para el sistema de mantenimiento. Esto incluye la actualización de equipos, la implementación de nuevas tecnologías y la optimización de recursos.
8. **Análisis del ciclo de vida del activo** Finalmente, se evalúan los costos y beneficios de los activos a lo largo de su vida útil, asegurando una gestión sostenible y rentable.

4.2. Herramientas a utilizar

Este análisis se apoya en tres herramientas clave que permiten un desarrollo eficaz del modelo de gestión, y orientada en los resultados:

4.2.1. Las 6M

El análisis basado en las 6M es una herramienta fundamental para garantizar una gestión de mantenimiento integral. Este enfoque permite evaluar de manera sistemática los principales factores que afectan el desempeño de los equipos y procesos dentro de una organización, además de ayudar a contextualizar la operación estudiada. Cada "M" representa un pilar crítico que debe ser considerado para asegurar la efectividad del mantenimiento y la continuidad operativa. A continuación, se detalla cómo cada uno de estos elementos contribuye al éxito del plan de mantenimiento:

- **Mano de Obra (MO)** La mano de obra se refiere al personal encargado de ejecutar las actividades de mantenimiento. Su capacitación, experiencia y especialización son esenciales para llevar a cabo las tareas con eficacia. En este proyecto, se destaca la importancia de la capacitación continua, asignación eficiente de recursos y seguridad laboral.
- **Materiales (MA)** El suministro adecuado de materiales y repuestos es crucial para evitar interrupciones innecesarias en las actividades de mantenimiento. Este aspecto incluye la gestión de inventarios, calidad de los materiales y evaluación de proveedores.
- **Métodos (ME)** Los métodos representan los procedimientos y estrategias establecidos para llevar a cabo el mantenimiento. Una buena metodología asegura consistencia y eficiencia en las operaciones.
- **Medio Ambiente** El medio ambiente incluye las condiciones físicas y externas que afectan el desempeño de los equipos y el entorno en el que operan, como las condiciones operativas, cumplimiento ambiental.
- **Maquinaria** La maquinaria incluye los activos físicos que son objeto de mantenimiento.
- **Medición** La medición se refiere al uso de indicadores clave de desempeño (KPIs) para evaluar la efectividad del mantenimiento.

4.2.2. Matriz de Criticidad Cualitativa-Cuantitativa

La matriz de criticidad es una herramienta clave en la gestión del mantenimiento que permite identificar, clasificar y priorizar los equipos en función de su impacto en la operación, la seguridad y los costos asociados. Este enfoque asegura que los recursos de mantenimiento se concentren en los activos más relevantes para el funcionamiento de la organización, maximizando la eficiencia y minimizando los riesgos.

La matriz de criticidad combina un análisis cualitativo y cuantitativo para evaluar cada equipo según criterios predefinidos. Entre estos criterios se encuentra el impacto en la operación, que evalúa cuánto afecta la falla de un equipo a la continuidad de las operaciones. Este impacto se mide en términos de tiempo de indisponibilidad, productividad

MATRIZ DE CRITICIDAD								
FRECÜENCIA	1	SC	SC	C	C	C	C	C
	2	SC	SC	SC	C	C	C	C
	.	NC	SC	SC	SC	C	C	C
	.	NC	NC	SC	SC	SC	C	C
	.	NC	NC	NC	SC	SC	C	C
	N	NC	NC	NC	NC	SC	SC	C
		1	2	.	.	.	.	M
CONSECUENCIA								

Figura 4.2: Matriz Genérica de Criticidad. [11]

perdida o costo de oportunidad. Otro criterio clave es el impacto en la seguridad, el cual considera el riesgo que representa la falla de un equipo para la seguridad de las personas, el medio ambiente y los bienes materiales.

Asimismo, se analiza el costo de mantenimiento, que incluye los recursos necesarios para reparar o sustituir un equipo en caso de falla, contemplando costos de repuestos, mano de obra y herramientas específicas. Por último, se evalúa la frecuencia de fallas, que mide cuán propenso es un equipo a fallar; aquellos equipos con alta frecuencia de fallas suelen ser considerados de mayor criticidad. Cada uno de estos criterios recibe un puntaje según su relevancia, y la combinación de estos valores permite determinar el nivel de criticidad de cada equipo.

Se establecen los criterios que serán evaluados para cada equipo y se asignan ponderaciones que reflejen su importancia relativa. Se recopila información histórica sobre el desempeño de los equipos, incluyendo frecuencia de fallas, costos de mantenimiento y tiempos de indisponibilidad. Luego, cada equipo es evaluado según los criterios establecidos y se le asigna un puntaje. Los equipos se dividen en categorías como alta criticidad, criticidad media y baja criticidad.

4.2.3. RCM (Reliability-Centered Maintenance)

El Reliability-Centered Maintenance (RCM), o Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, es una metodología ampliamente reconocida y utilizada para establecer planes de mantenimiento efectivos basados en la confiabilidad de los equipos. Su enfoque principal radica en identificar y priorizar las funciones esenciales de los activos, los modos de falla que pueden comprometer dichas funciones y las estrategias más adecuadas para mitigarlos. Esta metodología, introducida originalmente en la industria aeronáutica, ha demostrado ser altamente adaptable a diversos sectores industriales gracias a su enfoque

estructurado y analítico.

Principios fundamentales del RCM

Se fundamenta en una serie de principios clave que guían su implementación y aseguran su eficacia en la gestión del mantenimiento. En primer lugar, el RCM se enfoca en la definición clara de las funciones y estándares de rendimiento de los equipos, determinando lo que cada activo debe hacer para cumplir con los objetivos operativos y estableciendo parámetros medibles para evaluar su desempeño.

A partir de esto, se realiza una identificación exhaustiva de los modos de falla, analizando todas las posibles maneras en las que los equipos pueden dejar de cumplir sus funciones y las causas que originan estas fallas.

Otro principio esencial del RCM es la evaluación de las consecuencias de las fallas, clasificándolas en términos de su impacto en la operación, la seguridad, los costos y el medio ambiente. Este enfoque permite priorizar las fallas más críticas y enfocarse en mitigarlas de manera efectiva. A partir de esta evaluación, el RCM se encarga de la selección de las estrategias de mantenimiento más adecuadas para cada caso, considerando opciones como mantenimiento preventivo, predictivo, correctivo o incluso la necesidad de rediseñar el equipo si ninguna de las estrategias tradicionales resulta viable.

4.2.4. Ventajas del RCM frente a otras herramientas

El RCM destaca frente a otras herramientas de gestión de mantenimiento debido a las siguientes ventajas clave:

- **Enfoque en la función del equipo:** A diferencia de otras metodologías, el RCM no solo analiza los modos de falla, sino que también se enfoca en garantizar que el equipo cumpla con sus funciones esenciales bajo condiciones específicas de operación.
- **Priorización basada en consecuencias:** Una de las principales ventajas del RCM es su capacidad para priorizar fallas en función de sus consecuencias. Este enfoque permite destinar recursos a los problemas que más afectan la operación, la seguridad o los costos, optimizando el uso del presupuesto y del tiempo.
- **Adaptabilidad a distintos entornos:** El RCM puede aplicarse en una variedad de industrias y tipos de equipos, desde sistemas mecánicos hasta eléctricos y electrónicos. Su flexibilidad lo convierte en una herramienta versátil para diferentes contextos operativos.
- **Optimización de estrategias de mantenimiento:** Permite seleccionar las estrategias más adecuadas para cada equipo, combinando mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo según sea necesario, lo que resulta en un enfoque altamente personalizado.

- **Mejora continua:** Al incorporar un análisis constante de las fallas y de las estrategias de mantenimiento implementadas, el RCM fomenta un proceso de mejora continua, adaptándose a las condiciones cambiantes y a las nuevas tecnologías.
- **Reducción de costos operativos:** Al centrarse en las fallas críticas y optimizar los recursos, el RCM contribuye a reducir los costos asociados al tiempo de inactividad, las reparaciones no planificadas y las pérdidas operativas.
- **Enfoque en la seguridad y el medio ambiente:** Considera de manera explícita el impacto de las fallas en la seguridad de las personas, el medio ambiente y los bienes materiales, lo que lo hace particularmente valioso en industrias de alto riesgo.
- **Estandarización y documentación:** Proporciona un marco estructurado que facilita la estandarización de procesos y la documentación de los análisis, permitiendo una mejor comunicación y comprensión entre los equipos de trabajo.

Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad				Consecuencia: H = Oculta S = Seguridad A = Ambiental O = Operación N = No Operacional		Severidad en US\$: 1 = Menos de 1.000 2 = 1.000 a 10.000 3 = 10.000 a 100.000 4 = Más de 100.000		Severidad en Seguridad: 1 = Sin Lesión 2 = Lesión Leve 3 = Incapacidad 4 = Muerte		Criticidad: 1 = Insignificante 2 = Menor 3 = Mayor 4 = Alta			
Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (API T10M408)													
HOJA FMECA N° 1 de 15													
Facilitador :		Grupo Analista:		Activo Físico			Función:		Sistema : Motor Diesel Deutz 2012		Función:		
Fecha: Marzo 2012		Gerencia de Proyectos		Rockloader del Equipo Limpiavías Ferrocarril Tia.6 Mina Esmeralda			Recoger y cargar sobre un carro de acople el mineral caído en las vías fijas de ferrocarril Tia.6 durante su transporte.		Subsistema: Admisión de aire		Función:		
Verificado por: Dirección de Proyectos Mina		Observaciones: Revisión 1									Generar la potencia necesaria para el funcionamiento electrohidráulico y trabajo del Rockloader.		
											Suministrar aire para combustión del motor diesel		
N°	Conjunto / Componentes	Modo de Falla	Causa de Falla	Cómo Subita, Gradual, Infantil, Vida Útil	Cuándo Predecible / Aleatorio	Efectos de Falla				Tarea de Mantenimiento		Ejecutor	Frecuencia
						Consecuencias = C; Severidad = S; Criticidad = C _m	TMFR (horas)	C	S	C _m			
1	Toma de Aire	Restringida	Impacto	Subita	Aleatorio	Ingreso restringido de aire hacia los cilindros, combustión incompleta, motor pierde potencia. Generación de humos negros contaminantes.	1	A	1	1	Revisar el estado de la toma de aire, si se detecta deteriorada, avisar a mantenimiento.	Operador	c/ Turno
		Quebrada	Golpe	Subita	Aleatorio	Ingreso de aire contaminado al motor, se produce un desgaste prematuro de éste.	1	N	1	1	Revisar el estado de la toma de aire, si se detecta golpeada, tirada o quebrada, cambiar	Mecánico	c/ 250 hrs.
2	Ductos de admisión de aire	Roto/ cortado	Vibración	Gradual	Aleatorio	Ingreso de aire sin filtrar al motor, lo que genera un desgaste prematuro de sus componentes.	1	N	1	1	Verificar el estado de los ductos de admisión de aire del motor, si se detectan rotos o deteriorados, cambiar.	Mecánico	c/ 250 hrs.
3	Sujeciones de ductos de admisión de aire	Sueltas / cortadas	Vibración	Gradual	Aleatorio	Si las sujeciones se caen los ductos se deterioran por la vibración e ingresa aire sin filtrar al motor, desgaste prematuro del motor.	4	N	1	1	Revisar el estado de los pernos y tuercas de anclamiento del sistema de admisión de aire, en caso de encontrarse sueltas apretar, si alguno de estos elementos están rotados o cortados, cambiar.	Mecánicos	c/ 250 hrs.
4	Ductos de goma de admisión de aire	Roto	Envejecimiento	Gradual	Predecible	Ingreso de aire contaminado al motor, se produce un desgaste prematuro de éste.	1	N	1	1	Verificar el estado de los ductos de goma de admisión de aire del motor, si se detectan rotos o deteriorados, cambiar.	Mecánico	c/ 250 hrs.
5	Turbocompresor	Falla Turbocompresor	Desgaste	Vida Útil	Aleatorio	El volumen de aire hacia los cilindros es menor que el requerido, la combustión es incompleta. El motor pierde potencia.	4	O	2	2	Verificar presión del turbocompresor, si la presión es menor de 22 PSI, cambiar turbo.	Mecánico	c/ 3000 hrs.
		Operación Incorrecta	Gradual	Aleatorio	Paradas instantáneas repetitivas del motor dejan al turbo sin lubricación, resquebrajándose progresivamente hasta fallar. El motor pierde potencia	4	O	2	2	Preparar instructivo sobre la correcta puesta en marcha y detención del motor Diesel, difundir a operadores y mantenedores. (Reinstruir)	Ingeniería de Mantenimiento	Anual	
		Sello de cañería de presión y retorno aceite deteriorada	Vibración/Vida útil	Gradual	Aleatorio	El aceite del lubricación del motor se fuga, baja el nivel hasta que llega un momento que no es posible mantener una presión mínima de 0,8 bares para la lubricación del motor, la temperatura se eleva rápidamente por sobre lo normal existiendo la posibilidad de daño en los componentes del mismo. Se activan las protecciones deteniendo el motor.	4	O	2	1	Revisar el estado de los sellos de las cañerías de presión y retorno de aceite del turbo compresor, si se detectan fugas cambiar sellos.	Mecánico	c/ 3000 hrs.
6	Filtro primario de admisión de aire	Saturado	Medio ambiente	Gradual	Predecible	Ingreso restringido de aire hacia los cilindros, combustión incompleta, motor pierde potencia. Generación de humos negros contaminantes.	1	A	1	1	Verificar en el panel de control el estado del indicador de saturación del filtro primario de admisión de aire del motor diesel, si marca zona de saturación avisar a mantenimiento para cambio de filtro.	Operador	c/ Turno
											Cambiar elemento del filtro primario de admisión de aire.	Mecánico	c/ 250 hrs.
7	Válvula decantadora polvo del filtro de aire	Saturada de polvo	Medio ambiente	Gradual	Predecible	Las partículas contaminantes mas pesadas no se separan, saturando prematuramente el filtro primario de admisión de aire	1	N	1	1	Vaciar la válvula decantadora de polvo del filtro de aire, limpiar la ranura de descarga.	Mecánico	c/ 250 hrs.
8	Filtro secundario de admisión de aire (seguridad)	Saturado	Medio ambiente	Gradual	Predecible	Ingreso restringido de aire hacia los cilindros, combustión incompleta, motor pierde potencia. Generación de humos negros contaminantes.	1	A	1	1	Cambiar filtro secundario (seguridad) de admisión de aire.	Mecánico	c/ 500 hrs.
9	Atrazaderas de filtro y ductos admisión de aire	Sueltas / cortadas	Vibración / Desgaste	Gradual	Aleatorio	Ingreso de aire contaminado al motor, se produce un desgaste prematuro de éste.	1	A	1	1	Revisar el estado de las atrazaderas del filtro y ductos de admisión de aire, en caso de encontrarse sueltas apretar, si están en mal estado cambiar.	Mecánico	c/ 250 hrs.
10	Válvulas de admisión	Desregulada	Desgaste	Gradual	Aleatorio	El motor emite excesiva cantidad de humos, traqueteo audible, no alcanza las revoluciones máximas y no entrega la potencia requerida.	8	O	1	2	Regular válvulas de admisión del motor diesel a 0,3 "41 mm.	Mecánico	c/ 3000 hrs.

Figura 4.3: Ejemplo aplicación herramienta RCM. [11]

5. Marco teórico

El marco teórico de este informe proporciona las bases conceptuales necesarias para comprender los principios, herramientas y metodologías utilizados en el desarrollo del modelo de gestión de mantenimiento propuesto. A continuación, se describen los conceptos fundamentales que sustentan este trabajo. [1]

5.1. Mantenimiento

Se refiere al conjunto de actividades destinadas a conservar un artículo en condiciones óptimas o devolverlo a un estado en el que pueda cumplir con una función específica requerida. Estas actividades comprenden tanto acciones técnicas como administrativas necesarias para su implementación.

Actualmente estas acciones se clasifican en tres grandes categorías: mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.

5.1.1. Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo consiste en realizar un conjunto de intervenciones técnicas en un activo con el propósito de repararlo o reemplazarlo tras haber presentado una falla o un rendimiento inferior al esperado [2]. Su finalidad es restaurar el activo a su estado óptimo de operación previo al desperfecto.

5.1.2. Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo implica llevar a cabo tareas de mantenimiento planificadas en intervalos regulares, con el propósito de prevenir posibles fallas y evitar eventos inesperados. En esencia, se enfoca en intervenir en los equipos antes de que presenten problemas. [3]

5.1.3. Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo es una metodología que emplea herramientas y análisis de datos para identificar irregularidades en el funcionamiento de equipos y procesos, así como posibles defectos, con el objetivo de abordarlos antes de que ocurran fallos. [4]

5.2. Ingeniería de Mantenimiento

Tiene como objetivo dinamizar el desarrollo de los procesos de mejora continua en función a la mantención a través de:

- Establecer el contexto operacional
- Conocimiento del área
- Identificar brechas y oportunidades
- Análisis cuantitativo y cualitativo

Con estos puntos, se puede dar respaldo a las decisiones del área de mantención orientadas a mejorar la integridad operacional, diseñando los planes matrices de mantenimiento que permitan establecer el nivel de confiabilidad operacional óptimo que asegure el cumplimiento de la promesa.[11]

5.3. Confiabilidad

La confiabilidad es una métrica clave en la gestión del mantenimiento que mide la capacidad de un equipo, sistema o componente para cumplir consistentemente su función durante un periodo específico, sin fallas. Este indicador se asocia con la probabilidad de que un equipo opere correctamente bajo condiciones estándar. La confiabilidad se evalúa mediante técnicas como el análisis de modos y efectos de fallos (FMEA) y las pruebas de vida acelerada. Aumentar la confiabilidad implica reducir las fallas inesperadas y, en consecuencia, mejorar la planificación del mantenimiento y optimizar los recursos. Además, la confiabilidad está directamente relacionada con el MTBF, ya que sistemas con mayor confiabilidad suelen presentar mayores valores de tiempo medio entre fallas.

5.4. Disponibilidad

En cambio, la disponibilidad es la probabilidad de que un sistema, equipo o componente realice la función prevista cuando sea requerido. Este porcentaje tiene en cuenta la confiabilidad y la mantenibilidad. Matemáticamente, se define como:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

Este indicador combina la capacidad del equipo para operar sin fallas (*reliability*) y el tiempo necesario para su reparación (*maintainability*). Una alta disponibilidad es

crítica en procesos industriales y sistemas críticos, donde el tiempo de inactividad puede generar pérdidas significativas.

5.5. Utilización

La utilización, o factor de servicio, mide el tiempo efectivo de operación de un activo durante un periodo determinado.

Este indicador es particularmente útil para evaluar si los recursos están siendo utilizados de manera eficiente o si existe capacidad ociosa. En un entorno industrial, la baja utilización puede deberse a problemas de planificación, exceso de capacidad instalada o fallas en la programación del mantenimiento. Por el contrario, una alta utilización puede ser un signo de eficiencia, pero también puede indicar un riesgo elevado de sobrecarga en los equipos, lo que podría reducir su vida útil y aumentar la probabilidad de fallas.

5.6. Mantenibilidad

La mantenibilidad, también conocida como capacidad de mantenimiento, se refiere a la simplicidad, efectividad y seguridad con las que se ejecutan las actividades de mantenimiento tras identificar una falla en un equipo o activo [5]. Por lo tanto, evaluar la mantenibilidad implica determinar la probabilidad de restaurar el funcionamiento normal de un equipo una vez completado el mantenimiento.

5.7. Eficiencia

La eficiencia se entiende como la capacidad de "hacer las cosas de la manera correcta"[6]. Esto implica centrarse en la utilización óptima de los recursos disponibles, independientemente de la actividad realizada. El objetivo es alcanzar los resultados deseados empleando la menor cantidad de tiempo y dinero posible o, alternativamente, obtener resultados superiores utilizando los mismos recursos.

5.8. Tiempo Medio entre Fallos

El Mean Time Between Failures (MTBF) es un indicador clave de la fiabilidad de un sistema o componente. Este concepto resulta esencial en la gestión del mantenimiento, ya que proporciona una estimación del tiempo promedio durante el cual un sistema o componente operará de manera continua antes de presentar una falla. [7]

Matemáticamente, el MTBF se define como:

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

Un MTBF elevado indica un sistema confiable con fallas poco frecuentes, mientras que un valor bajo sugiere un equipo o componente propenso a fallar. Este indicador es esencial para optimizar la disponibilidad de los equipos, minimizar tiempos de inactividad y garantizar la continuidad operativa. Además, el MTBF se utiliza en combinación con otros indicadores como el MTTR para calcular la disponibilidad global de los equipos.

5.9. Tiempo Medio de Reparación

El Mean Time to Repair (MTTR) es un indicador que representa el tiempo promedio requerido para identificar, diagnosticar y reparar un componente o dispositivo que ha fallado, devolviéndolo a su estado operativo [8]. Este indicador no solo mide la eficiencia del proceso de reparación, sino también la mantenibilidad del equipo dentro de una organización, reflejando la capacidad de esta para abordar y resolver problemas de manera eficaz. Matemáticamente, el MTTR se define como:

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de reparaciones}}$$

Un MTTR bajo es deseable, ya que indica que los equipos pueden ser restaurados rápidamente, lo que minimiza el tiempo de inactividad y los costos asociados. Este indicador es particularmente útil para identificar cuellos de botella en los procesos de mantenimiento, mejorar la capacitación del personal técnico y optimizar los recursos utilizados en las reparaciones. Además, el MTTR, combinado con el MTBF, proporciona una visión integral de la disponibilidad operativa de los equipos.

5.10. Impacto operacional

El impacto operacional evalúa el efecto que tiene una falla en las operaciones generales de un sistema. Este análisis incluye la pérdida de productividad, la indisponibilidad de los equipos y los costos asociados.

El análisis del impacto operacional es crucial para priorizar las tareas de mantenimiento, ya que permite identificar equipos críticos cuyo fallo tendría consecuencias significativas en la operación. Además, este enfoque ayuda a optimizar los recursos asignados, mitigando riesgos y asegurando la continuidad de las operaciones.

5.11. Indicadores de desempeño (KPIs)

Son métricas utilizadas para evaluar el éxito de las estrategias de mantenimiento. Los KPIs comunes incluyen disponibilidad, tiempo de inactividad, y costos de mantenimiento.

El uso de KPIs facilita el seguimiento de objetivos específicos, como reducir el tiempo de inactividad, mejorar la eficiencia de las reparaciones y maximizar la disponibilidad de los equipos. Además, estos indicadores permiten a las organizaciones comparar su desempeño con estándares de la industria, identificar áreas de mejora y demostrar el retorno de la inversión en estrategias de mantenimiento.

5.12. Gestión

La gestión se define como el conjunto de procesos estructurados que incluyen planificar, organizar, controlar y liderar recursos y actividades con el propósito de alcanzar objetivos específicos de manera eficiente y efectiva. Este enfoque integral asegura una coordinación adecuada entre los diferentes elementos involucrados, optimizando el uso de los recursos disponibles y orientando los esfuerzos hacia el cumplimiento de las metas propuestas. [9]

5.13. Activo

Un activo se refiere a los bienes materiales que son propiedad de una persona, ya sea física o jurídica. Estos bienes pueden incluir máquinas, equipos, edificaciones, vehículos e incluso materias primas destinadas a ser utilizadas en procesos de producción. [10]

A lo largo del desarrollo de este documento se explican en detalle otros conceptos relacionados con el mantenimiento, los cuales serán introducidos en el contexto específico en el que resulten pertinentes. Por lo tanto, no es necesario incluir una definición detallada de todos ellos en esta sección, ya que su comprensión estará ligada a las explicaciones que se brindarán en capítulos posteriores. Esto permite que los conceptos se presenten de manera más clara y aplicados a las situaciones concretas del proyecto, facilitando su entendimiento y evitando redundancias en la información.

6. Desarrollo del Modelo de Gestión del Mantenimiento

Luego de esta introducción de conceptos y herramientas a utilizar, se da inicio al desarrollo del Modelo de Gestión del Mantenimiento, que sirve de base para crear un plan de mantenimiento que se adapte a las necesidades de la empresa.

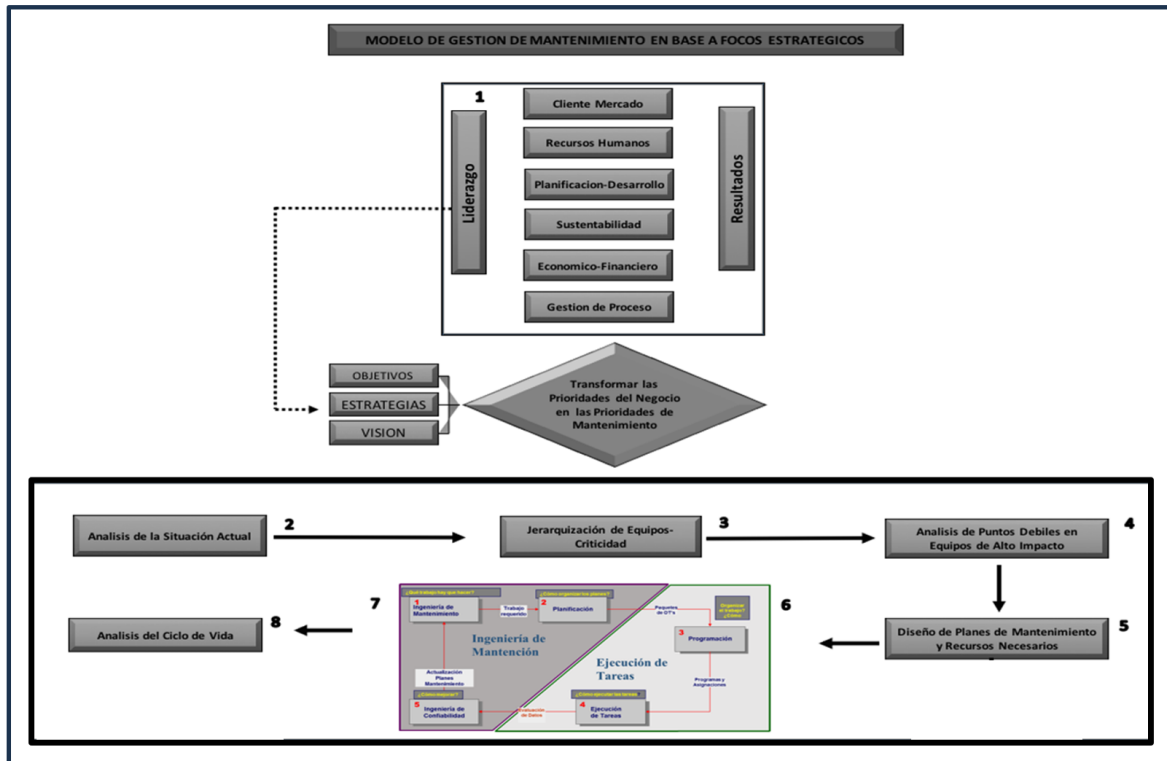


Figura 6.1: Modelo de Gestión del Mantenimiento con las etapas a utilizar. [11]

El modelo está compuesto por ocho etapas clave, diseñadas para abordar de manera estructurada las necesidades del sistema de mantenimiento. Cada etapa se enfoca en un aspecto crítico, desde la alineación estratégica con los objetivos empresariales hasta la implementación de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial. Este enfoque asegura que el mantenimiento no solo sea reactivo, sino que evolucione hacia un modelo predictivo y proactivo que garantice la continuidad operativa.

6.1. Etapa 1: Establecer propósitos de la empresa

La primera etapa del modelo de gestión de mantenimiento se centra en presentar los objetivos estratégicos de la empresa para luego tener un foco claro, en el cual se deben basar los objetivos del mantenimiento, ya que esto asegura que las prioridades del negocio se reflejen en las actividades de mantenimiento. En este contexto, se analizará de la empresa Copec, su misión, visión y objetivos, así como también los roles que se desempeñan dentro de la compañía y particularmente en el área de mantenimiento.

Copec es una de las empresas más grandes y reconocidas en Chile, dedicada principalmente a la distribución de combustibles y productos derivados del petróleo. La empresa posee una amplia red de estaciones de servicio (EDS), operando en el territorio nacional, con aproximadamente 685 estaciones a lo largo de Chile. Su presencia y liderazgo en el mercado de distribución de combustibles la convierten en un actor clave para la infraestructura energética y de servicios en el país.

Además de la distribución de combustibles, Copec se ha expandido a otras áreas de negocio, ofreciendo servicios complementarios como tiendas de conveniencia, servicios de alimentación, soluciones de energía para clientes industriales y comerciales. Esta diversificación le permite a la empresa mantenerse competitiva en un entorno de mercado en constante cambio.

6.1.1. Misión, Visión y Objetivos

Como se menciona anteriormente, Copec es una de las empresas líderes en Chile en el sector de la distribución de combustibles y servicios complementarios. Su propósito se define claramente en su misión, visión y objetivos:

- **Misión:** Proveer soluciones energéticas eficientes y confiables, comprometidos con la satisfacción del cliente, operando de manera segura y sustentable.
- **Visión:** Ser un líder en el sector energético en Chile y otros mercados, con altos estándares de innovación, eficiencia y responsabilidad social.
- **Objetivos estratégicos:**
 - Asegurar la confiabilidad operativa de las estaciones de servicio.
 - Optimizar costos operacionales a través de una gestión eficiente de recursos.
 - Garantizar seguridad y cumplimiento normativo en todas las operaciones.
 - Adoptar nuevas tecnologías que mejoren la sostenibilidad y eficiencia.

6.1.2. Áreas operativas de la empresa

Una vez establecidos los objetivos de la empresa, se procede a identificar las distintas áreas operativas que garantizan el cumplimiento de su misión y contribuyen al desarrollo continuo de su visión en el sector energético.

Primero se cuenta con las **Estaciones de Servicio (EDS)**, representan el punto de contacto directo entre la empresa y sus clientes finales. Como se ha mencionado anteriormente, Copec cuenta con 685 EDS en todo Chile, lo que garantiza una cobertura amplia y permite el acceso de sus clientes a combustible, productos y servicios complementarios en todo el territorio nacional, entregando diferentes servicios como:

- **Distribución de combustible:** Copec se encarga de la venta minorista de combustibles (Gasolina, Diesel) a través de sus estaciones de servicio, brindando un suministro confiable, cercano y seguro a sus clientes.
- **Tiendas de conveniencia:** Las EDS incluyen tiendas como Pronto y Punto Copec, que ofrecen una amplia gamma de productos, desde alimentos hasta artículos de primera necesidad, creando un punto de venta atractivo y accesible para el consumidor.
- **Servicios complementarios:** Dependiendo de la estación de servicio, se ofrecen prestaciones relacionadas con el automovilismo, como cambios de lubricantes, áreas dedicadas al lavado de automóviles y otros servicios diseñados para mejorar la experiencia del cliente. Estas opciones no solo añaden valor a las estaciones, sino que también fortalecen la fidelidad de los usuarios al proporcionar soluciones integrales para el cuidado de sus vehículos.



Figura 6.2: Estación de Servicio Copec. [12]

Por otro lado, Copec también suministra soluciones energéticas y combustibles a una diversa gama de **Clientes Industriales**. Este segmento incluye empresas de sectores estratégicos como la minería, el transporte, la construcción, la agricultura y otros, que dependen del suministro confiable de energía para sus operaciones diarias, los cuales corresponden a:

- **Suministro de combustible:** a diferencia del anterior este hace referencia a volúmenes mayores (gran escala) para satisfacer las demandas industriales, con la lógica necesaria para entregas en áreas remotas o de difícil acceso.
- **Soluciones de Energía:** Copec desarrolla servicios personalizados para optimizar el consumo de energía de sus clientes industriales, con un enfoque en la eficiencia y sostenibilidad energética.

Estas áreas operativas están diseñadas para funcionar de manera sinérgica, permitiendo a Copec mantener su posición de liderazgo en el sector energético. La diversificación de servicios y la constante innovación tecnológica no solo fortalecen su competitividad en el mercado, sino que también reflejan su compromiso con la excelencia operativa y la satisfacción del cliente.

6.1.3. Organigrama de la empresa

Copec se distingue como una organización compleja con múltiples áreas especializadas, cada una diseñada para cumplir con su misión de ofrecer servicios energéticos confiables y eficientes. La estructura organizativa refleja una división clara de responsabilidades, lo que optimiza el funcionamiento de sus operaciones, desde la distribución de combustibles hasta los servicios de mantenimiento.



Figura 6.3: Estructura General Copec. [13]

En la cúspide del organigrama se encuentran los altos ejecutivos, responsables de la toma de decisiones estratégicas y la supervisión general de la compañía. Las principales áreas operativas, según se detalla en el organigrama (Figura 6.3), desempeñan roles específicos alineados con los objetivos corporativos. A continuación, se describen las principales gerencias y sus funciones:

- **Gerencia General:** Lidera la estrategia corporativa y supervisa todas las divisiones operativas.
- **Gerencia de Finanzas y Administración:** Gestiona los recursos financieros y la administración general de la empresa.

- **Gerencia Comercial:** Desarrolla estrategias de venta, marketing y gestión de clientes.
- **Gerencia de Operaciones:** Supervisa la logística y distribución de combustibles.
- **Gerencia de Ingeniería:** Responsable de la gestión y mantenimiento de la infraestructura y tecnología.
- **Gerencia de Sostenibilidad y Medio Ambiente:** Asegura el cumplimiento normativo y promueve prácticas de responsabilidad ambiental.
- **Gerencia de Recursos Humanos:** Coordina la capacitación, reclutamiento y bienestar de los empleados.
- **Gerencia de Tecnología e Innovación:** Desarrolla e implementa nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia operativa.
- **Gerencia de Marketing:** Gestiona las estrategias de comunicación y posicionamiento de la marca.
- **Gerencia de Productos Digitales:** Diseña y supervisa productos digitales que complementen la oferta de servicios.
- **Gerencia Legal:** Garantiza el cumplimiento legal y apoya en asuntos regulatorios.
- **Contraloría:** Asegura el cumplimiento de normas internas y auditorías.

Dentro de esta estructura, el área de mantenimiento se encuentra bajo la Gerencia de Ingeniería, específicamente en la Subgerencia de Mantenimiento, que se encarga de garantizar la disponibilidad y eficiencia de los activos físicos clave. Este aspecto será profundizado en el siguiente punto.

6.1.4. Subgerencia de Mantenimiento

La Subgerencia de Mantenimiento en la empresa tiene un rol clave para asegurar la confiabilidad de los activos y equipos críticos en toda la organización, especialmente en las estaciones de servicio (EDS), que representan un punto de contacto directo con el cliente. La subgerencia está organizada en varias áreas operativas especializadas, cada una con responsabilidades específicas que contribuyen a mantener la continuidad y eficiencia en las operaciones. A continuación, se muestra el organigrama de la Subgerencia de Mantenimiento, para posteriormente entregar información sobre cada uno de estos cargos.

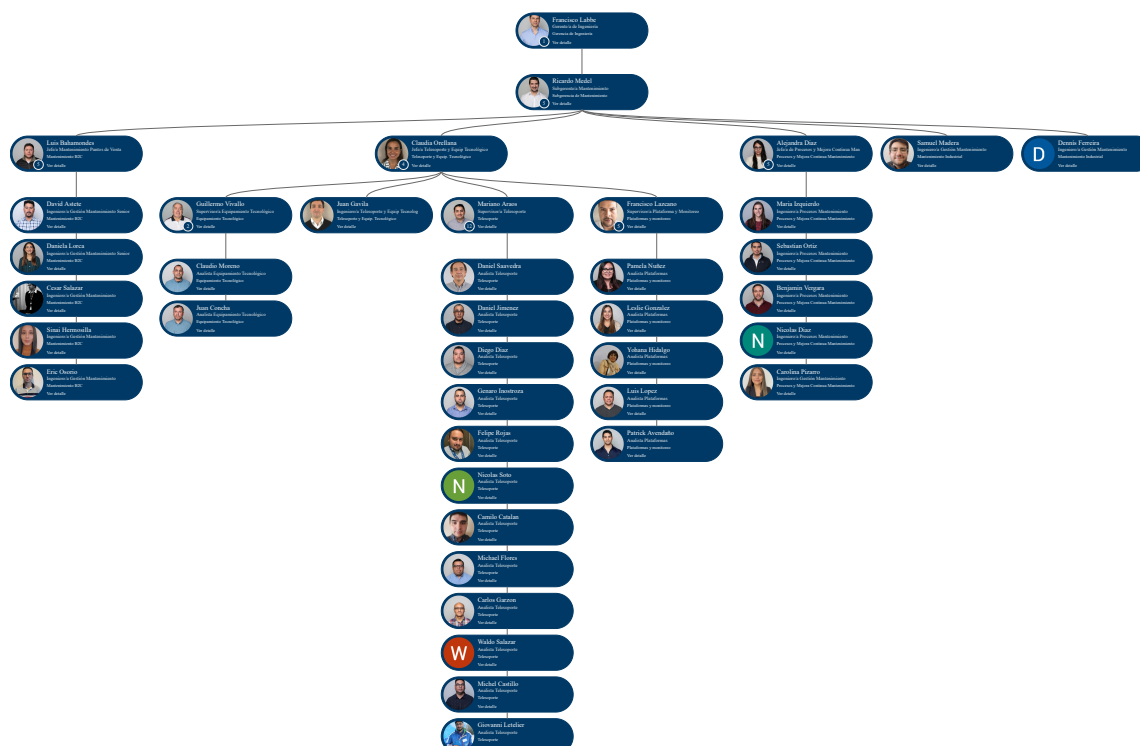


Figura 6.4: Estructura Subgerencia Mantenimiento. [13]

- **Mantenimiento B2C:** Esta área se especializa en garantizar el funcionamiento óptimo de las Estaciones de Servicio (EDS) y otros puntos de venta dirigidos al consumidor final. Su enfoque principal está en la gestión de activos que interactúan directamente con los clientes, como equipos y servicios de combustibles, sistemas de agua potable, y equipos en las tiendas de conveniencia. La eficiencia en esta área es crucial para ofrecer una experiencia confiable y satisfactoria al cliente.
- **Telesoporte y Equipamiento Tecnológico:** Responsable del soporte remoto y el mantenimiento de los sistemas tecnológicos en las estaciones de servicio. Este departamento asegura la operatividad continua de equipos tecnológicos esenciales, como los sistemas de pago electrónico, gestión de inventarios, y terminales de control. Su función es clave para mantener la continuidad del servicio y minimizar interrupciones operativas.
- **Procesos y Mejora Continua en Mantenimiento:** Dedicada a la optimización y evolución constante de los procesos de mantenimiento en toda la operación. Esta área implementa metodologías de mejora continua y realiza análisis de datos para identificar oportunidades de eficiencia. También se enfoca en desarrollar estrategias innovadoras que reduzcan costos y mejoren la confiabilidad de los activos.
- **Mantenimiento Industrial (B2B):** Encargada de la gestión y mantenimiento de equipos de gran escala en instalaciones industriales. Esta área asegura la confia-

bilidad y eficiencia de los equipos en procesos de alta demanda energética, siendo esencial para mantener la operación en niveles óptimos. Su enfoque abarca tanto el mantenimiento preventivo como correctivo en entornos industriales complejos.

Estas áreas operan coordinadamente para garantizar que todos los equipos críticos en las EDS y en las operaciones industriales de Copec funcionen correctamente, minimizando tiempos de inactividad y asegurando un rendimiento óptimo.

6.1.5. Foco de análisis

La Subgerencia de Mantenimiento B2C desempeña un rol clave en la operación de las Estaciones de Servicio (EDS) de Copec. Estas estaciones son puntos de contacto directo con los clientes y representan un componente esencial para mantener la imagen de la empresa y asegurar la satisfacción del consumidor.

Con una red de más de 685 estaciones de servicio distribuidas a lo largo de todo el territorio chileno, Copec ofrece una cobertura amplia y accesible para satisfacer las necesidades de sus clientes. Esta presencia, que abarca desde los rincones más remotos del norte hasta las zonas más australes del país, asegura que los productos y servicios de la compañía estén al alcance de millones de usuarios. La capacidad de mantener operativas estas instalaciones en todo momento no solo refuerza la continuidad operativa, sino que también fortalece la confianza y lealtad de los clientes hacia la marca.

La importancia del mantenimiento eficiente en estas estaciones se magnifica cuando se considera el impacto que cualquier interrupción en sus operaciones podría tener en la experiencia del cliente y en la percepción de la marca. Por ejemplo, un retraso o falla en el servicio puede traducirse en pérdidas económicas, insatisfacción del cliente e, incluso, en un deterioro de la imagen corporativa.

Para visualizar la magnitud de esta red y comprender la relevancia del mantenimiento, en la Figura 6.5 se presenta un mapa demográfico de las EDS de Copec en Chile. Este mapa evidencia la extensa cobertura nacional, destacando su presencia tanto en grandes centros urbanos como en localidades más aisladas. La amplia distribución geográfica subraya la importancia de implementar estrategias de mantenimiento eficientes y bien coordinadas, capaces de responder a las demandas operativas y garantizar un servicio confiable en todas las estaciones.

El enfoque en la gestión del mantenimiento no solo asegura la continuidad de las operaciones en estas EDS, sino que también permite a Copec mantenerse como líder en el mercado, cumpliendo con las altas expectativas de un sector altamente competitivo y exigente.



Figura 6.5: Distribución EDS en Chile. [15]

6.2. Etapa 2: Análisis de la situación actual del mantenimiento

En esta etapa del modelo de gestión de mantenimiento, se busca entender como funciona el sistema actual de mantenimiento en las estaciones de servicio de Copec. Se realiza este análisis en un proceso en específico para identificar áreas críticas e ineficiencias en las prácticas de mantenimiento, considerando siempre el contexto operacional en el que se encuentra el área de mantenimiento.

El objetivo del equipo de mantenimiento de la empresa es "garantizar la disponibilidad y eficiencia de los activos, equipos e instalaciones de la compañía y filiales mediante estrategias y procesos de mantenimiento que optimicen los recursos, reduzcan costos y maximicen la productividad". Este propósito no solo define claramente la dirección del

área de mantenimiento, sino que también refleja y refuerza los objetivos generales de Copec. La alineación entre los propósitos estratégicos de la empresa y los del mantenimiento asegura una coherencia que permite avanzar con una base sólida en el análisis de esta etapa.

Dado el alcance y la diversidad de actividades y servicios que ofrece Copec, como se menciona, el estudio se centrará en un proceso específico, sistema de agua potable, que actualmente presenta desafíos significativos debido a las pérdidas que genera ante fallas. Este proceso presente en una cantidad importante de estaciones de servicio es un área con amplias oportunidades de mejora, ya que incluye equipos críticos que actualmente se gestionan mediante un enfoque de mantenimiento correctivo.

El equipo principal en este contexto es la bomba sumergible de agua potable, cuyo desempeño es clave para el funcionamiento del sistema. Antes de abordar el análisis detallado de este activo, es fundamental entender el proceso en el que opera, así como realizar un diagnóstico que respalde la decisión de la empresa de priorizar su evaluación. Esta etapa y la siguiente se centrarán en establecer el foco crítico del sistema, proporcionando una justificación para las recomendaciones de mejora que se desarrollarán más adelante.

6.2.1. Enfoque Proceso de Agua Potable

Retomando lo planteado previamente, la empresa cuenta con un total de 685 Estaciones de Servicio (EDS) distribuidas estratégicamente a lo largo del país, asegurando una amplia cobertura para satisfacer las necesidades de sus clientes. De estas estaciones, solo 52 requieren el uso de un pozo profundo para la extracción de agua. Esta necesidad surge en aquellas ubicaciones alejadas de las redes de agua potable urbana, generalmente en zonas más rurales o aisladas, donde la infraestructura de servicios básicos no está disponible o no tiene la capacidad suficiente para abastecer las operaciones de la EDS.

Estas estaciones, que representan una fracción significativa del servicio, requieren un enfoque de mantenimiento específico y detallado para asegurar el suministro continuo de agua. A continuación, se muestra la figura 6.6, donde se visualiza de mejor manera la distribución de las EDS que cuentan con pozo para la alimentación de agua potable hacia la tienda. Se observa una menor concentración de estas en el centro de Chile, representadas con el color rosado, pero en Santiago, de color verde, aumenta significativamente y en el sur, de color azul, se muestra una gran cantidad de estaciones con este sistema de impulsión de agua pero distribuidos de manera menos concentrada que en Santiago, pero abarcan un mayor sector geográfico.



Figura 6.6: Distribución geográfica de EDS con pozo profundo. [16]

En este contexto, se tiene como objetivo asegurar la operación continua y eficiente del sistema de impulsión de agua potable en las estaciones de servicio que disponen de este recurso, que se dividen en los siguientes puntos:

- **Maximizar la disponibilidad del sistema:** el sistema debe estar operativo en todo momento para evitar interrupciones en el suministro de agua.
- **Aumentar la confiabilidad de los equipos:** minimizando las interrupciones en el flujo de agua a través de un mantenimiento adecuado.
- **Optimizar costos de mantenimiento:** reduciendo las intervenciones de emergencia, que significan que la EDS no esté en funcionamiento.

Proceso Agua Potable

El sistema de agua potable en las EDS con pozos propios sigue un flujo específico que asegura el transporte del agua desde el punto de extracción (fuente) hasta el consumo

en en la tienda y el edificio del Concesionario. A continuación en la figura 6.7 se puede observar el proceso completo y seguidamente una breve descripción de cada etapa:

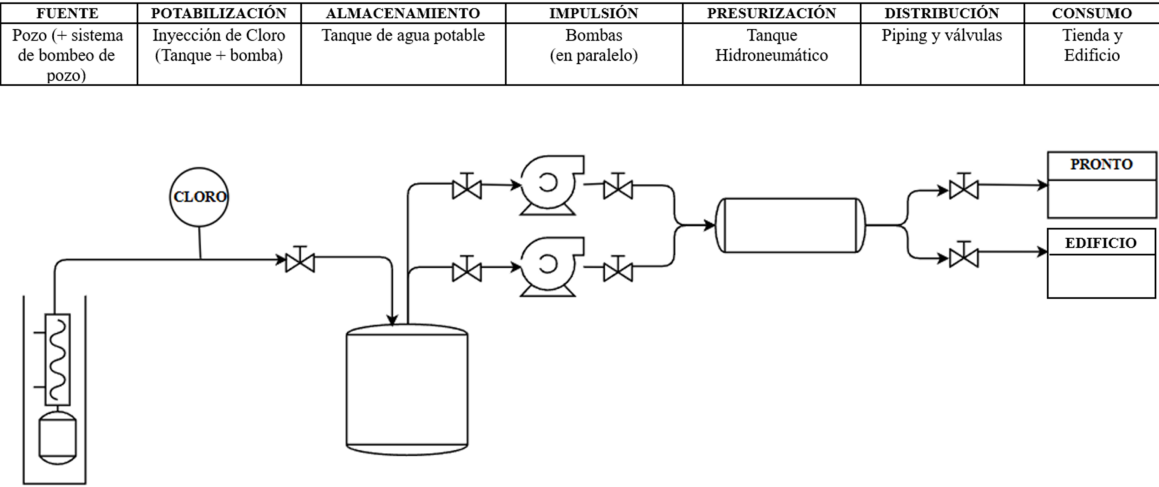


Figura 6.7: Diagrama del Proceso Agua Potable. Elaboración propia.

1. **Fuente:** En este sistema, la fuente de agua es un pozo profundo equipado con un sistema de bombeo que incluye una bomba sumergible y un motor. Este equipo extrae el agua subterránea desde el pozo, siendo el primer paso en la cadena de impulsión. Este sistema asegura que el agua bruta sea llevada hacia las etapas posteriores de tratamiento y distribución.
2. **Potabilización:** El agua extraída del pozo es sometida a un proceso de purificación para garantizar su calidad y potabilidad. Este proceso utiliza un tanque de cloro y una bomba inyectora que introduce cloro en la línea de agua. El cloro actúa como desinfectante, eliminando microorganismos y asegurando que el agua cumpla con los estándares de calidad requeridos.
3. **Almacenamiento:** Una vez tratada, el agua potable se almacena en uno o dos tanques diseñados para mantener una capacidad adecuada según las necesidades de la estación de servicio. Estos tanques juegan un rol esencial al garantizar una reserva constante de agua para mantener la operatividad incluso en periodos donde la demanda es alta.
4. **Impulsión:** El agua almacenada es transferida mediante bombas impulsoras configuradas en paralelo. Esta disposición permite una operación eficiente y asegura redundancia en caso de que una bomba falle. Estas bombas succionan el agua del tanque de almacenamiento y la dirigen hacia las siguientes etapas del sistema.
5. **Presurización:** Para mantener una presión constante en todo el sistema, se utiliza un tanque hidroneumático. Este componente trabaja en conjunto con las bombas impulsoras para asegurar un flujo de agua estable y continuo hacia los puntos de consumo.

6. **Distribución:** esta agua presurizada se distribuye a lo largo de este sistema a través de una red de tuberías (piping) y válvulas que aseguran que llegue a su destino final.
7. **Consumo:** el destino final de esta agua potable es el consumo de esta para la tienda (Punto o Pronto) y el edificio donde se encuentra el concesionario (baño, duchas, entre otros).

Este proceso, crucial para las operaciones de las estaciones, depende de la confiabilidad de cada equipo presente en las diferentes etapas de este sistema. Si algún componente del sistema falla, la operación de suministro de agua a la tienda puede interrumpirse, afectando la experiencia del cliente y la eficiencia de la estación.

6.2.2. Análisis Interno

Para realizar un análisis del estado actual del mantenimiento en el proceso de impulsión de agua potable, es esencial recopilar datos precisos mediante auditorías operativas. Estas auditorías permiten identificar debilidades, brechas y áreas de oportunidad dentro del sistema, estableciendo un panorama claro de las necesidades prioritarias de mantenimiento.

Con el fin de estructurar la información y analizar los factores críticos que influyen en el sistema de impulsión, se utiliza la herramienta de las 6M. Este marco facilita la comprensión del contexto operacional, destacando aspectos fundamentales que afectan el rendimiento y la sostenibilidad del proceso.

1. **Materiales:** Los materiales incluyen el agua tratada y los productos químicos necesarios, como el cloro utilizado en el proceso de cloración. Estos insumos son esenciales para garantizar la calidad del agua potable y su aptitud para el consumo humano.
2. **Mano de Obra:** Este factor involucra al personal técnico y de mantenimiento capacitado, responsable de ejecutar las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo en los equipos de impulsión. La experiencia y la formación continua de este personal son fundamentales para la operación eficiente y la resolución de problemas.
3. **Maquinaria:** Incluye todos los equipos que componen el sistema de impulsión, como el tanque de cloración, válvulas, tanque de almacenamiento, bombas de impulsión y el tanque hidroneumático. Cada uno de estos elementos desempeña un rol importante para garantizar el suministro continuo y eficiente de agua potable.
4. **Métodos:** Corresponde a los procedimientos de mantenimiento preventivo o correctivo implementados para cada equipo del sistema. Estos métodos están diseñados para reducir la probabilidad de fallas, mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de los activos o realizar el cambio debido al término de su funcionamiento.

5. **Medio Ambiente:** Este factor abarca la regulación del caudal de agua, la calidad del recurso extraído y las normativas ambientales que rigen la operación de los sistemas. Copec busca minimizar el impacto ambiental de sus operaciones y garantizar la sostenibilidad de sus actividades.
6. **Medición:** Actualmente se cuenta con sensores que miden parámetros de la bomba sumergible, como caudal, potencia y nivel de agua en el pozo, inicialmente con un propósito ambiental, para estar dentro de las normas chilenas de extracción de agua.

La herramienta de las 6M es útil para organizar la información y destacar áreas críticas como los materiales, la mano de obra, la maquinaria, los métodos, el entorno ambiental y las mediciones actuales. Con estos datos, se pueden priorizar mejoras, optimizar recursos y diseñar estrategias de mantenimiento más efectivas.

6.2.3. Rendimiento Actual del Sistema

El rendimiento actual del sistema de impulsión de agua potable se mide mediante varios indicadores clave que permiten evaluar su eficiencia y disponibilidad. La implementación de mantenimiento preventivo en los equipos (excluyendo la bomba sumergible) ha permitido una operación estable, aunque existen áreas de mejora:

- **MTTR** (Tiempo Medio de Reparación): para cada equipo del sistema completo de agua potable, se entrega un valor promedio del tiempo de reparación:

Equipo	MTTR
Bomba Sumergible	24 horas
Tanque Cloro/ Bomba Inyectora	1-2 horas
Bomba Impulsión	2-4 horas
Tanque Hidroneumático	1 hora
Válvulas	2 horas

Tabla 6.1: Tiempo Medio de Reparación Equipos

- **Disponibilidad del sistema:** La disponibilidad del sistema debe ser 100 %, para que no ocurran cierres de planta (EDS), para esto se cuenta con equipos configurados en paralelo o cuenta con un equipo de respaldo. Actualmente, el equipo que más afecta a la disponibilidad del sistema debido a su baja mantenibilidad, y su sistema de mantenimiento correctivo, es la bomba sumergible de agua potable, la cual puede provocar una indisponibilidad crítica en el sistema de agua potable hacia la tienda.

- **Costo de mantenimiento:**

El costo del mantenimiento preventivo realizado a la mayoría de los equipos y el mantenimiento correctivo ronda los 30 millones de pesos en un periodo de análisis

anual. Donde más se observan alzas en el costo del mantenimiento, es cuando se realiza el mantenimiento correctivo de la bomba sumergible, ya que su tiempo de respuesta es mucho más largo, y crítico debido a su ubicación.

6.2.4. Identificación de Brechas

A través del análisis del sistema actual, se han identificado varias áreas de mejora y brechas que afectan la eficiencia y confiabilidad de las prácticas de mantenimiento. Estos puntos críticos destacan la necesidad de adoptar enfoques más avanzados y proactivos para optimizar el rendimiento del sistema:

- Falta de monitoreo preventivo en componentes clave: Aunque el sistema cuenta con telemetría que proporciona datos sobre parámetros como caudal, potencia y altura de pozo, esta información se utiliza con propósitos normativos ambientales, es decir, para cumplir las normas establecidas por el país en la extracción de agua. La ausencia de herramientas predictivas limita la capacidad de prever problemas en componentes críticos, como las bombas sumergibles de agua potable. Esto aumenta la probabilidad de paradas no planificadas que afectan directamente la disponibilidad del sistema y generan costos adicionales por reparaciones de emergencia.
- Optimización del tiempo de respuesta: Actualmente, el tiempo promedio para reparar o reemplazar componentes del sistema puede extenderse debido a factores como la coordinación con contratistas, disponibilidad de repuestos, y la logística de transporte de equipos. Este proceso puede tomar varias horas o incluso días, dependiendo de la ubicación y la complejidad de la falla. Las demoras en la resolución de problemas impactan negativamente en la continuidad del servicio, especialmente en estaciones de servicio que dependen críticamente del agua potable para sus operaciones.

6.3. Etapa 3: Jerarquización de Equipos

Teniendo identificado el proceso y los equipos que participan en este sistema, se puede continuar con la tercera etapa del modelo de gestión del mantenimiento, la cual consiste en la jerarquización de los equipos críticos, que implica la identificación y priorización de los activos más importantes en el sistema de agua potable de las estaciones de servicio. El resultado de esta etapa permitirá optimizar los recursos de mantenimiento al enfocar los esfuerzos en los equipos cuya falla tendría el mayor impacto en la continuidad operativa y los costos.

6.3.1. Matriz de Criticidad

La metodología que se utilizará para jerarquizar los equipos es la **Matriz de Criticidad Cualitativa-Cuantitativa de Riesgo** (MCCR), la cual clasifica los equipos en diferentes categorías de acuerdo con su impacto en la operación y su probabilidad de falla, otorgando valores cuantitativos a categorías cualitativas como "bajo." "alto". Este método permite priorizar los activos más importantes y asignar los recursos de mantenimiento de manera eficiente.

La matriz de criticidad clasifica los equipos en una escala de importancia basada en dos dimensiones:

- **Consecuencia de Falla:** evalúa el impacto de una falla en el equipo sobre la operación general del sistema de impulsión de agua.
- **Frecuencia de falla:** analiza la probabilidad de que el equipo falle, en función a su historial y condiciones operativas.

$$Riesgo = FF * C \quad (6.1)$$

Donde:

- FF = Frecuencia de falla.
- C = Consecuencia de falla.

Cada equipo es evaluado y ubicado en la matriz según su puntuación en estas dos dimensiones, lo cual permite determinar su nivel de criticidad. La frecuencia de fallas (FF) refleja la periodicidad con la que un equipo requiere intervención. Esta dimensión se clasifica en cuatro niveles:

1. **Baja:** Equipos con pocas fallas a lo largo del tiempo, característicos de sistemas no críticos.
2. **Media:** Equipos con fallas ocasionales que no generan impactos significativos, pero que podrían convertirse en críticos si no se gestionan adecuadamente.
3. **Alta:** Equipos que presentan fallas frecuentes, requiriendo intervenciones regulares para mantener la operación.
4. **Muy alta:** Equipos con una frecuencia de fallas crítica, representando una amenaza constante para la continuidad del sistema.

La consecuencia (C) mide el impacto económico y operativo que tiene la falla de un equipo sobre el sistema, considerando su efecto en el EBITDA. Esta dimensión también se clasifica en cuatro niveles:

1. **Insignificante:** Fallas que no generan detenciones en el sistema ni afectan significativamente las operaciones.

2. **Moderado:** Fallas que pueden ocasionar interrupciones temporales, pero con impactos limitados en el sistema.
3. **Severo:** Fallas que provocan detenciones parciales del sistema, afectando la productividad.
4. **Catastrófico:** Fallas que generan la detención total del sistema, causando interrupciones completas en las operaciones y pérdidas significativas al EBITDA.

Para evaluar la criticidad de cada equipo en base a los resultados de las evaluaciones de la frecuencia y consecuencia de las fallas, se utiliza una matriz de criticidad 4 x 4, en la cual se identifican los equipos como críticos (C), semi-críticos (SC) y no críticos (NC). En esta matriz, los equipos críticos son aquellos cuya puntuación total es mayor o igual a 8. Los equipos semi-críticos son aquellos que obtienen una puntuación entre 4 y 6. Los equipos no críticos son los que obtienen una puntuación menor o igual a 3, ordenados como se muestra a continuación:

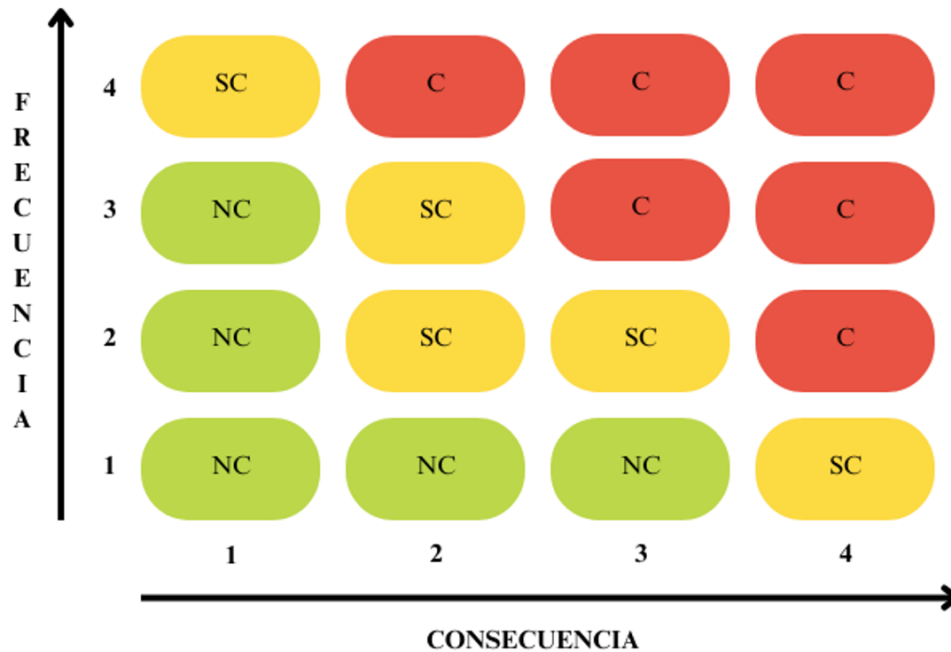


Figura 6.8: Matriz de Criticidad 4x4. Elaboración propia

Definida la matriz de criticidad a utilizar, se seleccionan los equipos relevantes para el proceso de impulsión de agua potable desde el pozo hacia la tienda (consumo humano):

- Bomba Sumergible de Pozo
- Tanque de Cloro y Bomba dosificadora
- Tanque de Acumulación Agua Potable

- Bomba de Impulsión
- Tanque Hidroneumático
- Piping y Válvulas

En este análisis, los elementos como piping y válvulas se tratarán como un único equipo, ya que las fallas que presentan suelen pertenecer a la misma categoría, como las filtraciones. De manera similar, aunque el tanque de cloro y la bomba dosificadora son equipos independientes en otros contextos operacionales, en este caso se consideran parte de un único sistema. Esto se debe a que las notificaciones de fallas se reportan bajo el concepto de "Proceso de potabilización", en lugar de especificar fallos individuales en la bomba dosificadora o el tanque de cloro. Por esta razón, ambos se analizan como un sistema integrado en este contexto.

El análisis se realizó considerando un periodo aproximado de un año, lo que proporciona un rango aceptable para evaluar las fallas de los equipos. A continuación, se presenta una tabla con los equipos del proceso, sus respectivas frecuencias de falla (FF), consecuencias (C), niveles de criticidad, y sus categorías:

Equipo	FF	C	Criticidad	Categoría
Bomba Sumergible Pozo	2	4	8	C
Tanque Cloro + Bomba dosificadora	1	4	4	SC
Tanque Agua Potable	1	1	1	NC
Bomba Impulsión	2	1	2	NC
Tanque Hidroneumático	1	1	1	NC
Piping + Válvulas	3	1	3	NC

Tabla 6.2: Evaluación Criticidad Equipos Sistema de Agua Potable

De esta evaluación, se identifican dos equipos prioritarios en términos de criticidad: la Bomba Sumergible del Pozo, clasificada como Crítica (C), y el Tanque de Cloro junto a la Bomba Dosificadora, clasificados como Semi-Críticos (SC). El resto de los equipos se consideran No Críticos (NC), como se detalla a continuación:

Equipo	Categoría
Bomba Sumergible Pozo	C
Tanque Cloro + Bomba dosificadora	SC
Tanque Agua Potable	NC
Bomba Impulsión	NC
Tanque Hidroneumático	NC
Piping + Válvulas	NC

Tabla 6.3: Resumen Categoría Criticidad Equipos

La **bomba sumergible** es el equipo más crítico dentro del sistema de impulsión de

agua, ya que su posición al inicio del flujo implica que cualquier falla provoca la detención completa del proceso. Esta criticidad se ve agravada por su baja mantenibilidad, lo que dificulta las labores de reemplazo o reparación, extendiendo los tiempos de inactividad y generando pérdidas económicas significativas por cada hora de retraso. Por otro lado, el **tanque de cloro y la bomba dosificadora**, aunque se consideran semicríticos, desempeñan un papel fundamental en el proceso de potabilización. Si bien su falla no detendría completamente el sistema, su mal funcionamiento podría comprometer la calidad sanitaria del agua, subrayando su importancia dentro del sistema.

El **tanque de acumulación de agua potable**, en cambio, tiene una baja criticidad debido a su función como depósito de almacenamiento, presentando pocas fallas y un impacto mínimo en la operación general del sistema. De manera similar, la **bomba de impulsión**, a pesar de ser esencial para el transporte del agua, se clasifica como no crítica gracias a la existencia de una bomba redundante que asegura la continuidad operativa en caso de fallas, reduciendo el impacto potencial en el sistema.

El **tanque hidroneumático**, encargado de mantener la presión en la línea de agua potable, también se considera no crítico, ya que su falla no detendría el sistema. Aunque podría reducir la presión, el flujo de agua continuaría sin mayores interrupciones. Finalmente, los elementos de **piping y válvulas** tienen una baja criticidad, ya que las fallas asociadas a estos componentes, como filtraciones o desgaste, suelen ser fáciles de reparar y no afectan significativamente el funcionamiento del sistema.

6.4. Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipo de alto impacto

Tras la jerarquización de los equipos realizada en la etapa anterior, se procede al análisis de riesgos y fallas, cuyo objetivo es recopilar información relevante sobre los equipos críticos identificados. En este caso, se obtuvo que solo existe un equipo crítico debido a su contexto operacional, bomba sumergible. Este análisis permitirá identificar los principales modos de falla del equipo y las causas raíz asociadas, proporcionando una base sólida para el desarrollo de estrategias de mejora.

6.4.1. Equipo Crítico

El equipo crítico identificado en el sistema de agua potable es la bomba sumergible, compuesta por un conjunto de motor y parte hidráulica. Su criticidad radica en su posición estratégica dentro de la cadena de suministro de agua, además de ser el único equipo actualmente sometido exclusivamente a mantenimiento correctivo. Esta situación conlleva altos riesgos operativos ante una falla inesperada, afectando directamente la continuidad del servicio.

La importancia de este equipo no solo se basa en su función clave de extraer y presurizar

el agua desde el pozo, sino también en el impacto que una falla tendría sobre la operación de las estaciones de servicio. Para llevar a cabo un análisis detallado de riesgos y fallas, es fundamental comprender el funcionamiento básico de las bombas sumergibles. Por ello, a continuación, se presenta una breve contextualización de estos equipos.



Figura 6.9: Bomba Sumergible Subline 150-6 acoplada a Motor Franklin. [19]

Las bombas sumergibles de pozo son equipos electromecánicos diseñados para bombear o drenar líquidos en los que están completamente sumergidas. Su principal ventaja radica en que pueden operar en contacto directo con el líquido, gracias a que su motor está herméticamente cerrado, evitando así la entrada de agua o cualquier otro fluido en el sistema [17]. Esto las hace ideales para su uso tanto con líquidos puros como con aquellos que contienen una cantidad moderada de materiales sólidos, dependiendo del diseño específico de cada modelo.

A diferencia de otras bombas, las bombas sumergibles se llenan de líquido de forma natural, lo que reduce el consumo energético. El motor solo se activa para extraer el líquido del interior de la bomba y elevarlo fuera del pozo. Esta elevación del líquido se logra gracias al principio de la energía centrífuga, en el cual el motor convierte la energía cinética del agua en energía de presión.

Por lo tanto, la bomba sumergible es, en esencia, una bomba de tipo centrífuga. Su funcionamiento se basa en una serie de impulsores que lanzan el agua hacia el exterior. Los impulsores tienen aspas curvadas hacia atrás que empujan el agua, permitiendo que esta entre a través de unos orificios en el centro de los impulsores. Una vez dentro, el agua es impulsada radialmente hacia afuera debido a la fuerza centrífuga, ganando así energía cinética y de presión. Esta energía acumulada permite que el agua alcance una altura considerable cuando es expulsada.

Para maximizar la eficiencia de este proceso, cada etapa de la bomba utiliza un componente estacionario conocido como difusor. Este difusor desvía el agua y la prepara para la siguiente etapa de impulsión, manteniendo el flujo controlado y estable. La sucesión de impulsores y difusores en una bomba sumergible permite multiplicar la presión en cada etapa, lo cual es la razón por la que estas bombas pueden producir una gran altura de presión. [18]

Una vez comprendido el funcionamiento de las bombas sumergibles, se pueden explorar las fallas comunes que podrían afectar su continuidad operacional y, por ende, la del sistema de agua potable. Según la literatura especializada, las posibles fallas en estos equipos incluyen [22]:

- **Desgaste de componentes mecánicos:** ejes, rodetes y sellos son propensos al deterioro por uso continuo.
- **Desacople entre motor y parte hidráulica:** una desconexión puede interrumpir completamente la operación del equipo.
- **Problemas de refrigeración:** Insuficiente disipación de calor que puede dañar componentes internos.
- **Succión de arena o gravilla:** este material abrasivo puede erosionar o dañar piezas internas y reducir la eficiencia.
- **Arranques frecuentes:** incrementan el desgaste del equipo y disminuyen su vida útil.
- **Golpeteo contra el encamisado del pozo:** que provocan vibraciones o desalineaciones que dañan tanto la bomba como el pozo.
- **Funcionamiento con succión de aire:** puede generar pérdida de presión y daños por cavitación.
- **Cavitación:** se genera una formación de burbujas de vapor que dañan las superficies internas.
- **Pérdida de eficiencia:** reducción progresiva del rendimiento hidráulico por desgaste o acumulación de suciedad.
- **Oxidación:** corrosión en componentes expuestos al agua y oxígeno.
- **Taponamiento del equipo de bombeo:** Acumulación de residuos que obstruyen el flujo de agua.
- **Embancamiento del equipo de bombeo:** depósitos de sedimentos que dificultan la operación de la bomba

6.4.2. Evaluación e Utilización de la Herramienta RCM

Con la teoría de las bombas sumergibles ya abordada, incluyendo su función principal y las posibles fallas, se procede al análisis de este equipo utilizando la herramienta RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). Este método ha sido seleccionado debido a su enfoque integral, ya que parte desde lo básico, analizando la función del activo crítico, para luego identificar cómo puede fallar, comprender las causas de dichas fallas y determinar cómo solucionarlas, siempre considerando el contexto operacional actual. Este enfoque garantiza un análisis estructurado y específico, alineado con las necesidades del sistema.

Para desarrollar esta etapa del modelo de gestión de mantenimiento, se centrará el análisis en una Estación de Servicio (EDS) específica, seleccionada no solo por su alto impacto en la economía de la empresa, debido a su elevado consumo de agua potable y ubicación estratégica, sino también porque se dispone de mayor información sobre su funcionamiento y fallas. Esto facilita un análisis más detallado y preciso. El cierre de esta EDS en caso de falla genera pérdidas significativamente mayores en comparación con otras estaciones, lo que refuerza la importancia de priorizarla en este estudio. Además, considerando que cada estación opera con diferentes modelos de bombas, caudales y potencias, este enfoque permitirá desarrollar un modelo detallado y un seguimiento específico que podrá ser replicado en otras EDS que utilizan pozos para su suministro de agua.

A continuación, se desarrollan las siete preguntas clave del RCM, que permitirán identificar puntos críticos del equipo y establecer la base para la siguiente etapa, el desarrollo del plan de mantenimiento.

Pregunta 1: ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo en su actual contexto operacional?

Para este análisis se debe contar con la información técnica del equipo, de tal manera de definir correctamente sus funciones que están limitadas por su contexto operacional. Primero mencionar, como se observa en la figura 6.9, se está trabajando con una bomba Subline, modelo 150-6, acoplada a un motor Franklin.

Bomba Sumergible de Pozo / Agua	
Especificación	Valor
Potencia Nominal	5.5 [kW]
Caudal Nominal	10.8 [l/s]
Presión Nominal	4 [bar]
Altura de elevación	46 [m]
Material	Acero inoxidable AISI 304
Suministro eléctrico	380 [V], 50 [Hz]
Corriente máxima	12.8 [A]

Tabla 6.4: Especificaciones Técnicas de la Bomba Sumergible

Como se menciona anteriormente, este modelo es característico por comenzar evaluando el equipo desde su función primaria, y considerando que la bomba sumergible de pozo cuenta con diferentes especificaciones dependiendo de su contexto operacional, como se muestra en la tabla 6.4, ya sea por la potencia nominal en la que debe operar, el caudal permitido en el sector o la profundidad en la que se encuentra el equipo. A continuación, se presenta la función primaria de la bomba con sus especificaciones relevantes:

Función primaria	Descripción		Descripción específica
1	Extraer agua desde el pozo y trasladarla hacia el tanque de acumulación con el caudal y presión requeridos para garantizar el suministro continuo.	1.1	Bombear agua desde el pozo a hacia el tanque a una altura de $(46 + 1)$ m.
		1.2	Bombear agua con un caudal máximo de 10.8 l/s.
		1.3	Bombear agua con una potencia de 5.5 kW.

Tabla 6.5: Especificación función primaria

Es importante destacar que el proceso de potabilización del agua no forma parte de la función primaria considerada, ya que este tratamiento se realiza mediante inyección directa a la línea de agua. Por lo tanto, el objetivo principal es garantizar que el agua llegue al tanque de acumulación.

En la tabla de especificaciones, 6.4, se observa el valor de **46 + 1 [m]**, que corresponde a la profundidad a la que se encuentra instalada la bomba (46 metros) más un metro adicional necesario para garantizar que el agua alcance el tanque de acumulación de agua potable.

El caudal nominal de **10.8 [l/s]** se basa en las especificaciones proporcionadas por la Dirección General de Aguas (DGA), que establece el límite máximo permitido para

la extracción de agua. Por su parte, la potencia de la bomba, de **5.5 [kW]**, es una especificación técnica propia del equipo.

Pregunta 2: ¿De qué manera falla en realizar sus funciones?

En seguimiento a las funciones específicas descritas previamente, se presenta a continuación una tabla que detalla las fallas funcionales asociadas a cada una de estas funciones. Este análisis permite identificar de manera más precisa los posibles escenarios en los que el equipo podría no cumplir con los objetivos para los cuales fue diseñado. La identificación de estas fallas funcionales es un paso fundamental para comprender las limitaciones operativas del equipo y desarrollar estrategias de mantenimiento enfocadas en prevenir o mitigar dichos escenarios. A continuación, se exponen las fallas funcionales categorizadas según cada función del equipo:

Función primaria		Específico		Falla Funcional	
1	Extraer agua desde el pozo y trasladarla hacia el tanque de acumulación con el caudal y presión requeridos para garantizar el suministro continuo.	1.1	Bombear agua desde el pozo a una altura de 47 m.	1.1.1	No alcanza la altura requerida.
				1.1.2	Interrupción del bombeo antes de completar
				1.1.3	Fugas o pérdidas de presión en la línea de impulsión
		1.2	Bombear agua con un caudal máximo 10.8 l/s.	1.2.1	Caudal insuficiente para satisfacer la demanda.
				1.2.2	Variaciones incontroladas en el caudal
				1.2.3	Operación fuera del rango de diseño del equipo
		1.3	Bombear agua con una potencia de 5.5 kW.	1.3.1	Sobrecarga del motor por exceso de demanda.
				1.3.2	Funcionamiento ineficiente o subutilización de potencia
				1.3.3	Consumo energético anormalmente alto

Tabla 6.6: Fallas funcionales asociadas ala función primaria de la bomba sumergible.

Una vez identificadas y definidas las fallas funcionales asociadas a las funciones específicas de la bomba sumergible, se puede proceder a determinar los modos de falla correspondientes a cada una de ellas. Este paso es crucial para entender de manera detallada cómo se manifiestan estas fallas en el equipo y qué mecanismos o condiciones las generan. La información que será entregada a continuación es en base a la literatura ya descrita anteriormente y de acuerdo a lo obtenido en descripciones de fallas debido a los avisos realizados por los mantenedores cuando han realizado un cambio de bomba.

Falla Funcional		Modo de falla	
1.1.1	No alcanza la altura requerida	1.1.1.1	Desgaste de los impulsores, reduciendo la capacidad de generar presión.
		1.1.1.2	Cavitación debido a niveles de agua inadecuados en el pozo.
		1.1.1.3	Obstrucción parcial en las tuberías de impulsión.
1.1.2	Interrupción del bombeo antes de alcanzar la altura	1.1.2.1	Sobrecalentamiento del motor por operación continua fuera de los rangos nominales.
		1.1.2.2	Fallo eléctrico debido a pérdida de fase o contactos dañados.
		1.1.2.3	Desacople entre el motor y la parte hidráulica.
1.1.3	Fugas o pérdida de presión en la línea de impulsión	1.1.3.1	Daño mecánico en las juntas o conexiones.
		1.1.3.2	Corrosión en las tuberías por exposición prolongada al agua.
		1.1.3.3	Vibraciones excesivas que aflojan los acoples.

Tabla 6.7: Modos de falla Función 1.1

Falla Funcional		Modo de falla	
1.2.1	Caudal insuficiente	1.2.1.1	Cavitación que interrumpe el flujo continuo.
		1.2.1.2	Obstrucción en el sistema de succión por partículas sólidas.
		1.2.1.3	Desgaste en los sellos o rodetes, reduciendo la eficiencia.
1.2.2	Variaciones incontroladas en el caudal	1.2.2.1	Entrada intermitente de aire al sistema.
		1.2.2.2	Movimiento de partículas en suspensión, afectando el rendimiento.
		1.2.2.3	Mal funcionamiento del sistema de control o sensores.
1.2.3	Operación fuera del rango de diseño del equipo	1.2.3.1	Fallo en los sensores o dispositivos de telemetría.
		1.2.3.2	Configuración incorrecta en el sistema de control.

Tabla 6.8: Modos de falla Función 1.2

Falla Funcional		Modo de falla	
1.3.1	Sobrecarga del motor	1.3.1.1	Fricción excesiva en componentes internos por falta de lubricación.
		1.3.1.2	Funcionamiento prolongado en condiciones de cavitación.
		1.3.1.3	Sobrecarga eléctrica debido a conexiones inadecuadas.
1.3.2	Funcionamiento ineficiente o subutilización de potencia	1.3.2.1	Caída de voltaje en el suministro eléctrico.
		1.3.2.2	Fallo en el motor por pérdida de fase.
		1.3.2.3	Sobrecarga en otros equipos del sistema eléctrico.
1.3.3	Consumo energético anormalmente alto	1.3.3.1	Impulsores desalineados o desgastados.
		1.3.3.2	Funcionamiento del motor con rodamientos dañados.
		1.3.3.3	Desbalanceo en el conjunto hidráulico.

Tabla 6.9: Modos de falla Función 1.3

Pregunta 3: ¿Qué causa el Modo de Falla?

Con las fallas funcionales y sus modos de falla ya identificados, el siguiente paso crítico es profundizar en el análisis de las causas raíz que generan dichos modos. Este proceso permite desentrañar los factores específicos que originan los problemas operativos en la bomba sumergible y en los sistemas asociados, proporcionando así una base sólida para implementar soluciones efectivas. La identificación de las causas raíz no solo aborda los síntomas de las fallas, sino que también busca prevenir su recurrencia mediante estrategias de mantenimiento más adecuadas.

El análisis presentado se estructura en función de las principales categorías de modos de falla previamente definidas. Cada modo de falla está vinculado a una causa raíz específica, que se detalla cuidadosamente para ofrecer una comprensión clara de las circunstancias que llevan a la ocurrencia de estas fallas. Este nivel de detalle es crucial para desarrollar medidas correctivas y preventivas específicas que puedan aplicarse de manera efectiva.

En las tablas que siguen, se resumen los resultados de este análisis para las funciones operativas principales de la bomba. Cada entrada de las tablas está organizada para mostrar el modo de falla identificado junto con su correspondiente causa raíz. Estas causas raíz se agrupan según la función a la que están asociadas, lo que facilita una evaluación estructurada y permite priorizar acciones según su impacto en el sistema.

Las tablas también reflejan cómo ciertos factores recurrentes, como el desgaste, la cavitación, las obstrucciones o los fallos eléctricos, afectan distintas partes del sistema. Por ejemplo, en la Tabla 6.10, se detalla cómo fenómenos como la abrasión por partículas sólidas o la refrigeración inadecuada contribuyen a los modos de falla de la función 1.1. En la Tabla 6.11, se amplía el análisis hacia los problemas en el sistema de succión y el

control, mientras que la Tabla 6.12 aborda fallos relacionados con componentes internos y eléctricos.

Además, estas tablas destacan patrones comunes entre los modos de falla y sus causas raíz, permitiendo identificar áreas críticas de mejora en el diseño, la operación y el mantenimiento del sistema. La Figura 6.5 complementa esta información al proporcionar un contexto visual sobre la distribución de las estaciones de servicio y su infraestructura asociada, resaltando la importancia de este análisis en el mantenimiento eficiente de estas instalaciones.

Modo de falla		Causa Raíz
1.1.1.1	Desgaste en los impulsores	Abrasión por partículas sólidas en el agua (arena o grava).
1.1.1.2	Cavitación	Niveles de agua insuficientes en el pozo o caudales de succión inadecuados.
1.1.1.3	Obstrucción parcial en las tuberías de impulsión	Acumulación de sedimentos o residuos en la línea de impulsión.
1.1.2.1	Sobrecalentamiento del motor	Refrigeración inadecuada debido a un diseño deficiente o falta de mantenimiento.
1.1.2.2	Fallo eléctrico	Pérdida de fase en el suministro eléctrico o contactos desgastados.
1.1.2.3	Desacople entre el motor y la parte hidráulica	Instalación incorrecta o desgaste excesivo en los acoples.
1.1.3.1	Daño mecánico en las juntas o conexiones	Vibraciones excesivas en la línea de impulsión.
1.1.3.2	Corrosión en las tuberías	Exposición prolongada al agua sin revestimientos protectores.
1.1.3.3	Vibraciones excesivas que aflojan los acoples	Desbalanceo en el sistema hidráulico.

Tabla 6.10: Causas Raíz Función 1.1

Modo de falla		Causa Raíz
1.2.1.1	Cavitación	Operación fuera de los parámetros nominales de diseño.
1.2.1.2	Obstrucción en el sistema de succión	Entrada de partículas sólidas debido a un filtro defectuoso o ausente.
1.2.1.3	Desgaste en los sellos o rodets	Alta frecuencia de operación en condiciones de caudal o presión no nominales.
1.2.2.1	Entrada intermitente de aire al sistema	Mal estado o daño en el sistema de sellado del pozo.
1.2.2.2	Movimiento de partículas en suspensión	Agitación del sedimento en el fondo del pozo debido a fluctuaciones en los niveles de agua
1.2.2.3	Mal funcionamiento del sistema de control	Fallo en los sensores de flujo o falta de calibración.
1.2.3.1	Fallo en los sensores o dispositivos de telemetría	Daños en el cableado o errores en la programación del sistema.
1.2.3.2	Configuración incorrecta en el sistema de control	Falta de supervisión durante las tareas de configuración inicial.

Tabla 6.11: Causa Raíz Función 1.2

Modo de falla		Causa Raíz
1.3.1.1	Fricción excesiva en componentes internos	Desgaste natural de los rodamientos o sellos
1.3.1.2	Funcionamiento prolongado en condiciones de cavitación.	Operación continua bajo niveles de agua inadecuados.
1.3.1.3	Sobrecarga eléctrica debido a conexiones inadecuadas.	Mal dimensionamiento del circuito eléctrico o contactores defectuosos.
1.3.2.1	Caída de voltaje en el suministro eléctrico.	Problemas en la red eléctrica externa.
1.3.2.2	Fallo en el motor por pérdida de fase.	Mal estado de los relés térmicos o contactores.
1.3.2.3	Sobrecarga en otros equipos del sistema eléctrico.	Mal distribución de cargas en el sistema.
1.3.3.1	Impulsores desalineados o desgastados.	Vibraciones excesivas o impactos durante la instalación o el funcionamiento.
1.3.3.2	Funcionamiento del motor con rodamientos dañados.	Contaminación interna por ingreso de agua o partículas debido a fallos en los sellos.
1.3.3.3	Desbalanceo en el conjunto hidráulico.	Instalación incorrecta o golpes durante el montaje.

Tabla 6.12: Causas Raíz Función 1.3

Pregunta 4: ¿Qué sucede cuando la falla ocurre?

Identificar las consecuencias proporciona una visión más completa del problema, facilitando la priorización de acciones correctivas, preventivas o predictivas. A continuación, se presenta una tabla que detalla las consecuencias asociadas a cada falla funcional previamente identificada.

Falla Funcional		Consecuencia
1.1.1	No alcanza la altura deseada	El agua no llega al tanque de acumulación, interrumpiendo el suministro a la tienda y forzando la parada de operaciones en la estación de servicio.
1.1.2	Interrupción del bombeo antes de alcanzar la altura	Pérdida total de la capacidad de bombeo, obligando a depender de camiones aljibes para garantizar el suministro de agua.
1.1.3	Fugas o pérdida de presión en la línea de impulsión	Pérdida de presión en el sistema, disminución del caudal disponible y posibles daños estructurales en las tuberías debido a la pérdida constante de agua
1.2.1	Caudal insuficiente	No se cumple con la demanda de agua requerida, provocando interrupciones parciales en el servicio de la tienda.
1.2.2	Variaciones en el caudal	Oscilaciones en el flujo de agua que generan fluctuaciones en la presión de los equipos aguas abajo, afectando los sistemas hidráulicos de la tienda.
1.2.3	Operación fuera del rango nominal	Aumento del desgaste de componentes como válvulas y conexiones, reduciendo la vida útil del sistema.
1.3.1	Sobrecarga del motor	El motor se sobrecalienta y eventualmente se detiene debido a la activación de sistemas de protección, generando una pérdida total de capacidad de bombeo.
1.3.2	Subutilización de la potencia disponible	Operación ineficiente del sistema, generando menor caudal y presión, además de un incremento en los costos operativos.
1.3.3	Consumo energético elevado	Incremento en el costo de operación eléctrica y mayor probabilidad de sobrecarga en el sistema eléctrico, afectando otros equipos conectados.

Tabla 6.13: Consecuencias de las Fallas

Pregunta 5: ¿De qué forma afecta la falla?

Para poder analizar esta pregunta, se tendrán en consideración 3 aspectos, Operacional (O), Económico (E) y de Seguridad (S), para las diferentes fallas funcionales mencionadas:

1.1.1 No alcanza la altura deseada:

- **O:** Interrupción del suministro de agua al tanque de acumulación, causando paralización en las operaciones de la tienda.
- **E:** Costos asociados al uso de camiones aljibes para suplir la falta de agua, junto con pérdidas de ingresos por interrupción de servicio.
- **S:** Riesgo de conflictos con los clientes debido a la falta de servicios esenciales.

1.1.2 Interrupción del bombeo antes de alcanzar la altura:

- **O:** Pérdida total de la capacidad de bombeo, generando un desabastecimiento crítico.
- **E:** Aumento significativo de los costos operativos por soluciones de emergencia (contratación de camiones).
- **S:** Incremento en el riesgo de fallas colaterales por estrés en otros sistemas.

1.1.3 Fugas en la línea de impulsión:

- **O:** Reducción de la presión en el sistema, disminuyendo el flujo hacia la tienda.
- **E:** Incremento en el consumo de energía debido al esfuerzo adicional del sistema de bombeo.
- **S:** Posible acumulación de agua en áreas no deseadas, generando riesgos de accidentes.

1.2.1 Caudal insuficiente:

- **O:** No se satisface la demanda de agua de la tienda, afectando las actividades normales.
- **E:** Pérdidas por reducción en la capacidad de venta y operaciones comerciales.
- **S:** Potenciales daños en equipos aguas abajo por funcionamiento en condiciones de baja presión.

1.2.2 Variaciones en el Caudal:

- **O:** Oscilaciones en el flujo afectan la estabilidad del suministro.
- **E:** Daños en componentes sensibles al flujo irregular, aumentando los costos de mantenimiento.
- **S:** Fluctuaciones que podrían provocar accidentes o fallas en sistemas dependientes.

1.2.3 Operación fuera del rango nominal:

- **O:** Aceleración del desgaste de componentes, reduciendo la vida útil del sistema.
- **E:** Costos adicionales por reemplazo prematuro de componentes.
- **S:** Riesgo de fallas inesperadas debido a operación fuera de parámetros.

1.3.1 Sobrecarga del Motor:

- **O:** Parada del sistema de bombeo debido a la activación de sistemas de protección.
- **E:** Costos asociados al reemplazo del motor y al uso de recursos alternativos para el suministro de agua.
- **S:** Riesgo de sobrecalentamiento y fallas eléctricas peligrosas.

1.3.2 Subutilización de la potencia disponible:

- **O:** Operación ineficiente del sistema, generando una entrega inadecuada de agua.
- **E:** Incremento en los costos energéticos debido a la operación prolongada.
- **S:** Riesgo bajo, pero con potencial de estrés en otros componentes eléctricos.

1.3.3 Consumo energético elevado

- **O:** Reducción de la eficiencia general del sistema, afectando el rendimiento.
- **E:** Aumento del costo de operación eléctrica y posibles multas por consumo energético excesivo.
- **S:** Riesgo bajo, pero con impacto acumulativo en el sistema.

Pregunta 6: ¿Qué puede ser hecho para predecir/prevenir las fallas?

El análisis realizado hasta ahora ha permitido identificar que las fallas relacionadas con la vida útil de la bomba sumergible son predecibles gracias al monitoreo continuo de parámetros clave proporcionados por la telemetría existente: caudal, altura de pozo y potencia consumida. Estas variables han demostrado ser indicadores críticos de las condiciones operativas de la bomba y posibles signos tempranos de fallas.

Uno de los aspectos clave para realizar un mantenimiento predictivo eficiente es el comportamiento de la potencia consumida. Se ha observado que, en horas o días previos a una falla, la potencia muestra peaks considerables en comparación con su potencia nominal, lo que indica un incremento en el esfuerzo del motor. Este patrón puede ser correlacionado con herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para anticipar fallas y emitir alertas que permitan tomar medidas antes de que el equipo falle completamente.

Otro indicador importante es la relación entre el caudal bombeado y la potencia consumida. En condiciones normales, esta relación es constante. Sin embargo, si se observa una disminución en el caudal sin cambios en las condiciones de operación, esto puede

señalar problemas como obstrucciones en el impulsor, desgaste en los componentes internos, o una caída en el nivel de agua en el pozo. De manera similar, un aumento en la potencia sin un aumento proporcional en el caudal puede ser un signo de pérdida de eficiencia hidráulica debido a desgaste interno.

El nivel de agua en el pozo también juega un rol importante. Si este desciende por debajo de los valores recomendados, puede generar cavitación en el sistema, lo que no solo afecta la eficiencia de la bomba sino que también pone en riesgo el motor al trabajar con una mezcla de aire y agua.

Es importante destacar que, debido a la baja mantenibilidad de la bomba sumergible (por su diseño sellado y especificaciones técnicas), hay parámetros que no se pueden prevenir directamente, como el desgaste de rodets o impulsores. Abrir la bomba comprometería su funcionamiento y fidelidad, lo cual no es una opción viable según el diseño del equipo. Sin embargo, los parámetros ya mencionados permiten predecir muchas de las fallas funcionales antes de que afecten la continuidad operativa.

A continuación, se detallan las tareas predictivas relacionadas con las fallas funcionales predecibles:

Falla Funcional		Tareas Predictivas
1.1.1	No alcanza la altura requerida	Implementar sensores de presión en la línea de impulsión y utilizar IA para analizar patrones históricos y en tiempo real. Emitir alertas si se detecta una disminución gradual de presión sin cambios en el caudal.
1.1.2	Interrupción del bombeo antes de alcanzar la altura	Monitorear el consumo energético del motor y parámetros hidráulicos mediante telemetría. Utilizar IA para identificar sobrecalentamientos o desacoples inminentes.
1.1.3	Fugas o pérdida de presión en la línea de impulsión	Instalar sensores de presión en la línea de impulsión y utilizar IA para detectar caídas anómalas en la presión, emitiendo alertas para inspección temprana.
1.2.1	Caudal insuficiente	Monitorear el caudal de manera continua mediante telemetría y usar IA para correlacionar disminuciones en caudal con niveles de partículas suspendidas en el agua. Emitir alertas si el caudal cae por debajo del rango nominal.
1.2.2	Variaciones incontroladas en el caudal	Analizar la estabilidad del caudal con herramientas de IA. Si se detectan fluctuaciones repetitivas en intervalos cortos, asociarlas a posibles obstrucciones o cavitación y emitir alertas predictivas.
1.2.3	Operación fuera del rango de diseño del equipo	Supervisar parámetros operativos (caudal, presión, potencia) continuamente. Emitir alertas si se detectan desviaciones fuera del rango nominal mediante IA.
1.3.1	Sobrecarga del motor	Monitorear el consumo energético del motor. Utilizar IA para identificar aumentos progresivos en la potencia consumida, asociados con fricción interna o sobrecarga. Alertar antes de que ocurra la falla total.
1.3.3	Consumo energético elevado	Integrar sensores de temperatura y vibración al sistema de monitoreo. Utilizar IA para correlacionar anomalías de temperatura con incrementos en el consumo energético y emitir alertas antes de que el motor se sobrecaliente o sufra daños mecánicos.

Tabla 6.14: Soluciones Predictivas

Pregunta 7: ¿Qué puede hacerse si acaso una tarea proactiva no puede ser encontrada?

Cuando no es posible implementar tareas proactivas debido a limitaciones técnicas, operativas o de diseño, las fallas deben ser gestionadas inicialmente mediante un enfoque correctivo. Esto significa responder a las fallas cuando ocurren, asegurando que el impacto operativo sea minimizado y que el sistema pueda recuperarse lo más rápido posible. Sin embargo, el Árbol de Decisiones del RCM resalta la necesidad de evaluar, como última instancia, un rediseño del sistema o del equipo para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

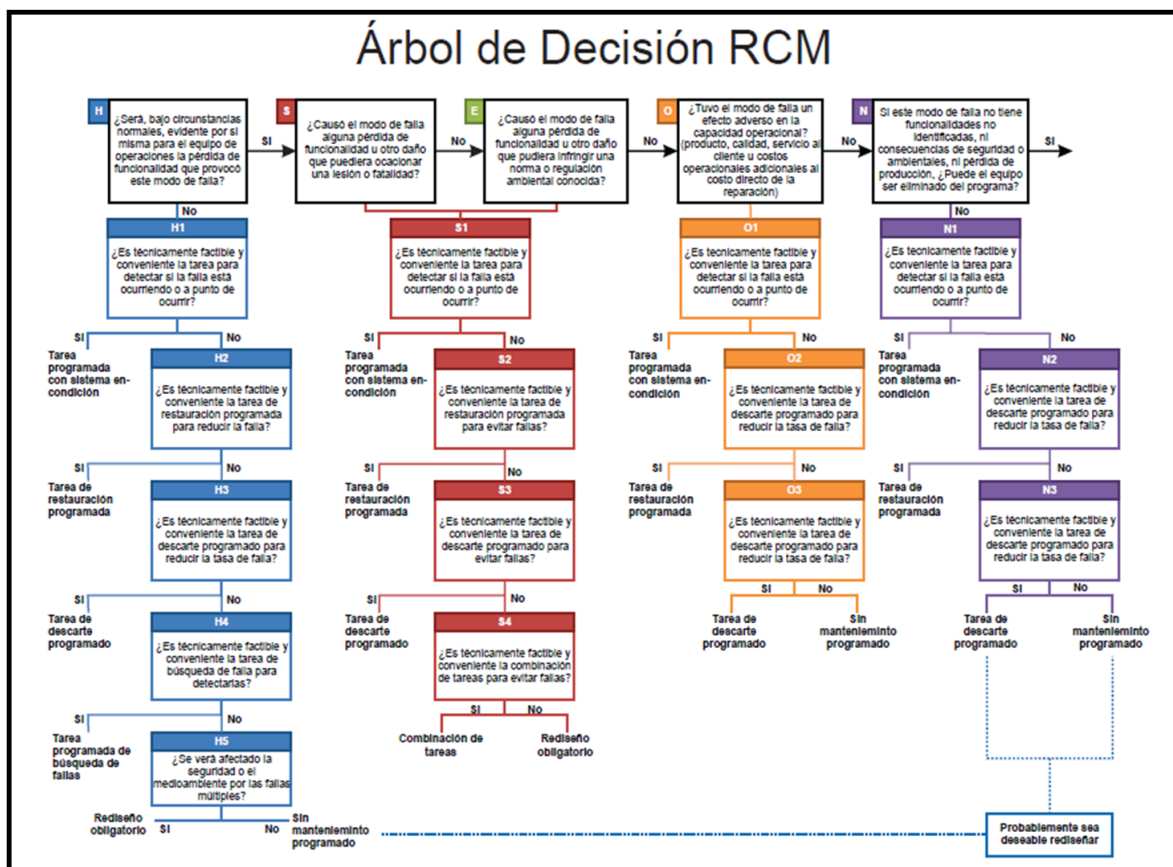


Figura 6.10: Árbol de Decisiones RCM

El proceso comienza con la identificación de aquellas fallas que no pueden preverse o prevenirse. Estas son generalmente fallas asociadas a:

- Factores externos: Como problemas en la red eléctrica, instalaciones defectuosas o daños ambientales.
- Limitaciones del diseño del equipo: Por ejemplo, la imposibilidad de realizar mantenimiento interno debido al sellado de la bomba sumergible.

Una vez identificadas estas fallas, el Árbol de Decisiones permite explorar diferentes acciones correctivas y, si estas no son suficientes, plantea la evaluación del rediseño como último recurso.

Por lo tanto, es fundamental optimizar el mantenimiento correctivo para minimizar los tiempos de inactividad y garantizar la continuidad del servicio. Esto incluye:

- Disponibilidad de repuestos críticos para respuestas rápidas.
- Planes de contingencia bien definidos, como la utilización de bombas de respaldo o camiones aljibes.
- Capacitación del personal técnico para manejar fallas de manera eficiente.

Por otro lado, el rediseño puede abordarse desde dos perspectivas principales:

1. Rediseño Configuracional: Implica realizar cambios en el entorno operativo del equipo para mitigar las causas de las fallas. Por ejemplo: Implementar sistemas de respaldo eléctrico (generadores o baterías) en estaciones donde los cortes de energía son frecuentes. Mejorar la instalación de componentes eléctricos, como mufas, para garantizar su fiabilidad.
2. Rediseño del Equipo: Consiste en trabajar con los fabricantes para adaptar el diseño del equipo a las necesidades específicas del sistema. Por ejemplo: Desarrollar bombas que mantengan el sellado para garantizar su fidelidad, pero que permitan el reemplazo de componentes clave como impulsores o rodetes. Incorporar características que faciliten la mantenibilidad sin comprometer la eficiencia o funcionalidad de la bomba.

Si las acciones correctivas no logran reducir el impacto de las fallas o si estas son recurrentes y críticas, se debe evaluar el costo-beneficio de un rediseño integral del sistema. Esta medida es considerada como una última instancia debido a su impacto en términos de tiempo e inversión económica.

6.5. Etapa 5: Diseño del plan de mantenimiento y recursos necesarios

El diseño del plan de mantenimiento predictivo se fundamenta en un análisis detallado realizado en la estación de servicio (EDS) 20606 Freire, seleccionada debido a que contaba con la mayor cantidad de información operativa y de fallas acumulada. Esta estación presentó dos eventos consecutivos de falla, con una diferencia de cuatro años entre ellos, lo que permitió observar patrones clave en los parámetros monitoreados mediante telemetría, especialmente en la potencia consumida.

La potencia demostró ser el indicador más relevante, ya que mostró peaks anómalos y comportamientos divergentes respecto a los valores nominales antes de que ocurrieran las fallas. Este análisis manual de los datos recolectados permitió concluir que los

patrones de potencia, junto con el caudal y la altura del pozo, pueden utilizarse como base para un modelo predictivo.

Con esta información, se plantea trabajar con un modelo de Inteligencia Artificial (IA) basado en algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) para anticipar fallas en las bombas sumergibles. Este modelo será entrenado utilizando los parámetros operacionales recopilados de la EDS seleccionada y, posteriormente, podrá replicarse en otras estaciones con características similares.

El plan de mantenimiento predictivo está estructurado en tres etapas principales, integrando la recopilación de datos, la emisión de alertas y la retroalimentación del sistema para garantizar un ciclo continuo de mejora. A continuación, se describen cada una de las etapas del plan.

6.5.1. Creación del Programa de IA

La primera etapa se centra en la recopilación, análisis y modelado de los datos provenientes de la telemetría instalada, utilizando herramientas de Machine Learning para el desarrollo de un sistema de predicción de fallas. Este programa incluye los siguientes pasos:

- **Recopilación de datos:** los parámetros operativos históricos y operativos capturados por la telemetría (caudal, potencia y nivel de agua) se centralizan mediante la API Clickie, para luego enviarlos al área de Data Analytics para su procesamiento. Estos datos forman la base del modelo predictivo.
- **Identificación de patrones y entrenamiento del modelo:** mediante algoritmos como árboles de decisión, redes neuronales u otro, se identifican patrones históricos y anómalos en el comportamiento de las bombas. El modelo se entrena inicialmente con los datos disponibles para establecer rangos operativos normales.
- **Validación del Modelo y configuración de alertas:** una vez entrenado el modelo se valida comparando sus predicciones con eventos históricos documentados. Se configuran alertas automáticas divididas en tres niveles de severidad:
 1. **Condición Anómala:** los parámetros monitoreados presentan variaciones leves fuera del rango normal, pero no implican un riesgo inmediato. La bomba debe seguir siendo monitoreada.
 2. **Condición de Peligro:** Las desviaciones son más significativas, indicando un riesgo creciente de fallo. En este nivel, se prioriza la EDS afectada y se intensifica el monitoreo.
 3. **Aviso de Mantenimiento Inmediato:** Cuando las desviaciones son considerables, el modelo genera una alerta indicando la necesidad de realizar el cambio de bomba antes de que ocurra una falla total. Este aviso incluye recomendaciones específicas generadas por el modelo de IA.

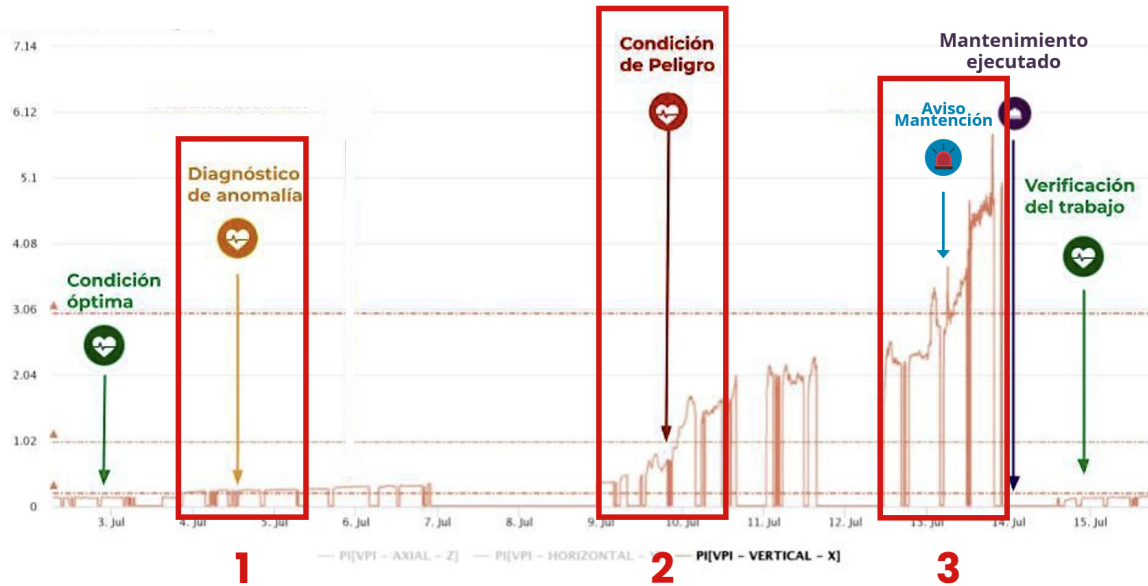


Figura 6.11: Configuración Severidad Avisos. [29]

La figura 6.11 presenta una representación teórica del comportamiento de los parámetros monitoreados por telemetría en las bombas sumergibles de las Estaciones de Servicio (EDS). Cabe destacar que el eje Y no tiene unidades de medida definidas, ya que puede representar diferentes parámetros de interés, como vibraciones, potencia, caudal o cualquier otra variable relevante. Por su parte, el eje X corresponde a la proyección del tiempo, mostrando la evolución de dichos parámetros en una línea de tiempo teórica.

En la etapa inicial, el sistema opera dentro de sus rangos normales, representados por la zona verde, **zona óptima**. Los parámetros monitoreados permanecen por debajo de la línea horizontal punteada, indicando que el equipo está funcionando bajo condiciones óptimas. En esta fase, no se detectan anomalías ni comportamientos fuera del estándar, por lo que no se requiere ninguna acción correctiva o de mantenimiento.

Conforme pasa el tiempo, los parámetros comienzan a salir ligeramente del rango nominal, lo cual genera una alarma de nivel 1, etiquetada como **condición anómala**. Este nivel sugiere que existe una desviación leve en el comportamiento del equipo, pero no representa un riesgo inmediato de falla. En este punto se recomienda monitorear de forma continua los parámetros. Además, no se ejecuta ninguna acción de mantenimiento, ya que el equipo podría volver a su condición óptima sin intervención.

Si los parámetros continúan desviándose y exceden considerablemente los rangos nominales, se activa una alarma de nivel 2, que indica una **condición de peligro**. En esta etapa la EDS afectada debe priorizarse para evaluación, ya que el riesgo de falla es creciente. Este nivel puede considerarse crítico, ya que las condiciones actuales podrían replicar escenarios registrados previamente que culminaron en fallas si no se interviene oportunamente.

Si la condición de peligro persiste y empeora, se activa una alarma de nivel 3, que

representa un **aviso de mantenimiento** inmediato. Este nivel indica que la bomba sumergible fallará dentro de las próximas 24 horas (programación inicial de predicción). Por lo tanto, se genera una acción planificada para el reemplazo de la bomba, evitando así interrupciones inesperadas en las operaciones de la EDS.

Una vez realizada la intervención, la figura 6.11 muestra el punto en el que se concluye el mantenimiento ejecutado. Se confirma que el nuevo equipo instalado opera dentro de los rangos óptimos de funcionamiento y se realiza una verificación final para garantizar que el sistema está completamente operativo y las condiciones de operación se han restablecido.

Tras comprender el comportamiento teórico de los parámetros de telemetría, se analiza un caso real en una Estación de Servicio (EDS) específica. Este análisis busca observar cómo los parámetros registrados, particularmente la potencia, permiten predecir fallas de la bomba sumergible. Aunque la figura teórica presentaba un aumento claro y progresivo en los parámetros, los datos reales ofrecen un panorama más complejo pero igualmente revelador.

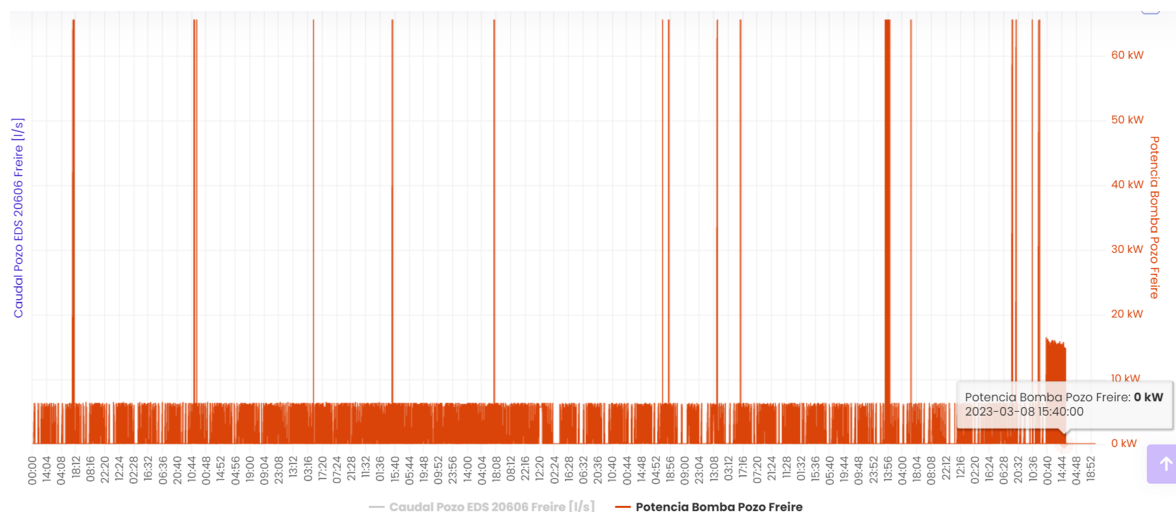


Figura 6.12: Caso Real EDS. [16]

La imagen 6.12 muestra datos recopilados en tiempo real mediante la plataforma Clickie, que registra lecturas cada minuto y convierte la información en gráficos. Para este análisis, se toma como referencia el comportamiento de la potencia de la bomba, ya que, aunque los demás parámetros (caudal y nivel de agua) proporcionan información complementaria, no entregan indicios inmediatos de falla inminente.

En el gráfico se observa que bajo condiciones normales, la potencia de la bomba se mantiene estable en un rango cercano a 6.5 kW. Sin embargo, durante los días previos a la falla registrada en enero de 2023, aparecen picos recurrentes que alcanzan hasta 66 kW, representando un esfuerzo anómalo de la bomba para mantener el caudal requerido. Este comportamiento repetitivo es indicativo de una situación crítica, sugiriendo que algo en el sistema está demandando un sobreesfuerzo del equipo.

El rango temporal mostrado en esta gráfica abarca aproximadamente dos meses, destacando que las anomalías en la potencia se intensifican progresivamente hasta que se produce la falla total. Para una visión más completa, los datos fueron exportados a Excel, generando un gráfico con un rango temporal de cinco meses, que se muestra a continuación:

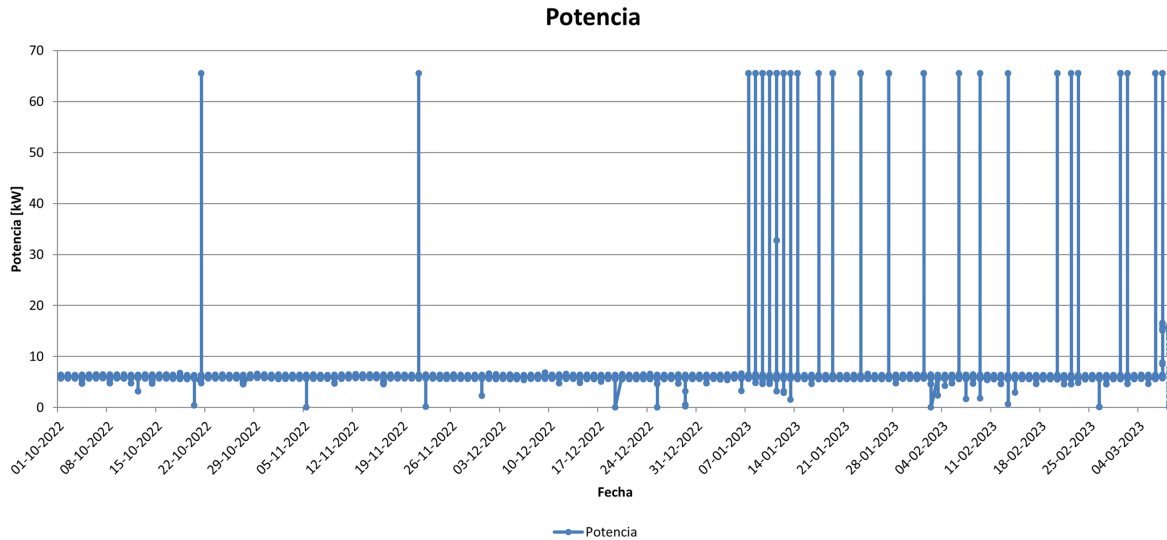


Figura 6.13: Comportamiento potencia 5 meses previos a la falla. Elaboración propia.

Este análisis extendido revela que la primera anomalía ocurre en octubre de 2022, se registran peaks aislados que indican un inicio temprano de comportamientos fuera de los rangos nominales. Luego a partir de enero de 2023, los peaks anómalos se vuelven más frecuentes y de mayor magnitud. Finalmente, dos meses después, el sistema colapsa, confirmando la tendencia progresiva observada.

Este comportamiento demuestra que, con un monitoreo adecuado, es posible identificar patrones críticos con antelación. La información sugiere que una alarma de nivel 3 debería configurarse cuando la potencia sea aproximadamente 10 veces su valor nominal y muestre una frecuencia creciente, como se observa en el gráfico.

6.5.2. Aviso de Falla

La segunda etapa del plan se activa cuando el modelo de IA detecta una anomalía severa en los parámetros monitoreados. En este caso, se emite un aviso de mantenimiento inmediato con al menos 24 horas de anticipación, permitiendo al equipo de mantenimiento realizar las siguientes tareas:

- **Recepción del Aviso:** El mantenedor recibe una alerta de nivel 3 generada por el sistema, indicando la necesidad de reemplazar la bomba sumergible.

- **Gestión de Recursos:** Se inicia la adquisición de los recursos necesarios, incluyendo: una nueva bomba sumergible, una grúa pluma para la extracción e instalación de la bomba y coordinación con camiones aljibes para llenar temporalmente el tanque de agua, evitando un cierre prolongado de la EDS.
- **Ejecución del Cambio:** Se realiza el reemplazo de la bomba siguiendo los procedimientos estándar, asegurando que la operación de la EDS sea restablecida rápidamente.

6.5.3. Evaluación y Retroalimentación

La tercera etapa del plan tiene como objetivo validar las predicciones realizadas por el modelo de IA y mejorar su capacidad de anticipación mediante un ciclo de retroalimentación continua. Este proceso incluye:

- **Evaluación de la bomba retirada:** la bomba retirada es enviada al centro de distribución, donde un técnico especialista realiza una evaluación técnica detallada. Se genera un informe técnico que incluye modos de falla detectados, evaluación de la condición de la bombas (e.g, desgaste, obstrucción, cavitación). Además de entregar una validación sobre la predicción del modelo, si fue acertada, es decir la bomba fue retirada justo antes de fallas o si la predicción fue muy precipitada y la bomba aún tenía vida útil.
- **Retroalimentación del Modelo de IA:** los resultados del análisis técnico son incorporados al modelo de IA ajustando sus parámetros para mejorar su precisión y reducir errores en futuras predicciones.

6.6. Etapa 6: Programación, Ejecución, Evaluación y Control de la ejecución del mantenimiento y optimización de recursos

Esta etapa del modelo de gestión del mantenimiento se centra en planificar, organizar, ejecutar y controlar el plan de mantenimiento predictivo diseñado previamente, asegurando que los recursos se asignen de manera óptima y que el proceso sea efectivo en la anticipación de fallas y su posterior ejecución del cambio de la bomba. Además, en esta etapa se busca garantizar que el sistema se retroalimente constantemente para mejorar las estrategias y procedimientos implementados.

6.6.1. Programación detallada

La programación detallada del plan de mantenimiento predictivo se divide en tres etapas principales: creación del modelo de IA, aviso de falla y evaluación y retroalimentación.

A continuación, se presentan las tareas específicas asociadas a cada etapa, junto con sus duraciones estimadas, dependencias, y una representación gráfica para facilitar la comprensión del flujo de actividades.

La etapa de **creación del modelo de IA** implica pasos necesarios para desarrollar un modelo basado en inteligencia artificial (Machine Learning) que permita predecir fallas con suficiente antelación. El modelo, como se explicó antes, se alimenta de datos históricos recopilados mediante telemetría, indicando patrones operacionales para entrenar el modelo y configurar alertas predictivas.

Creación del Modelo			
Tarea		Duración [mes]	Dependencia
A	Recopilación datos históricos	1.5	-
B	Identificación de patrones	1	A
C	Entrenamiento Inicial Modelo IA	2	B
D	Validación del modelo	1	C
E	Configuración de alertas	0,5	D

Tabla 6.15: Programación de la Creación del Modelo IA

La figura siguiente representa de manera gráfica esta programación mostrando claramente la secuencia de actividades y sus dependencias, y como se puede observar se estima que este proceso inicial dure 6 meses.

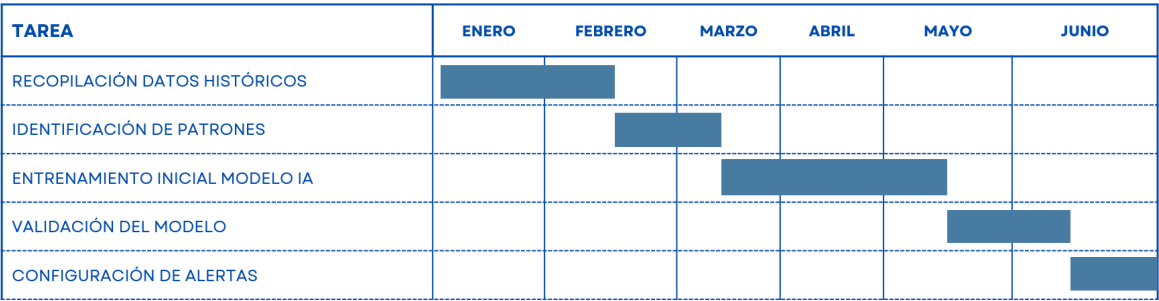


Figura 6.14: Programación Modelo IA. Elaboración propia.

El mayor tiempo está dedicado a la recopilación de datos históricos y el entrenamiento del modelo, ya que son procesos fundamentales para garantizar la calidad de las predicciones. La configuración de alertas es la última tarea, ya que depende de los resultados del modelo validado. Se estima que esta etapa tendrá una duración aproximada de 6 meses y se llevará a cabo únicamente una vez, ya que, posteriormente, el enfoque estará en la retroalimentación continua del modelo.

Luego se establecen las acciones para realizar una vez que el modelo de ML detecte un aviso de nivel 3, lo que implica la necesidad de realizar una cambio de bomba.

Aviso Falla			
Tarea		Duración [hora]	Dependencia
A	Recepción aviso (Mantenedor)	1	-
B	Gestión adquisición BS y grúa	12	A
C	Coordinación camión aljibe	12	A
D	Cambio de bomba	5	B

Tabla 6.16: Programación Aviso Falla

El siguiente diagrama muestra visualmente la duración y dependencia de estas tareas, resaltando cómo se interrelacionan para minimizar el tiempo de inactividad de la estación de servicio:

TAREA	1 HR	12 HR	5 HR
RECEPCIÓN AVISO (MANTENEDOR)			
GESTIÓN ADQUISICIÓN BS Y GRÚA			
COORDINACIÓN CAMIÓN ALJIBE			
CAMBIO DE BOMBA			

Figura 6.15: Programación Aviso Falla. Elaboración propia.

La recepción del aviso es una tarea crítica que inicia el proceso. Las demás actividades dependen de esta acción inicial. La coordinación del camión aljibe y la gestión de recursos (bomba nueva y grúa) deben realizarse en paralelo para optimizar el tiempo. Estos datos indican que el proceso desde que se da aviso al mantenedor y se realiza el cambio de bomba transcurren aproximadamente 20 horas.

Tras la ejecución del mantenimiento, la etapa de **retroalimentación**, se enfoca en el análisis de la bomba retirada para retroalimentar el modelo de IA. El objetivo es mejorar su precisión y efectividad en futuras predicciones.

Evaluación y Retroalimentación			
Tarea		Duración [semanas]	Dependencia
A	Envío bomba a centro distribución	1	-
B	Evaluación técnica	1	A
C	Generación informe técnico final	0.5	B
D	Retroalimentación IA	1.5	C

Tabla 6.17: Programación Evaluación y Retroalimentación

La figura siguiente ilustra el flujo de actividades para esta etapa, destacando cómo las tareas se organizan secuencialmente, con sus respectivas dependencias:

TAREA	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
ENVÍO BOMBA A CENTRO DISTRIBUCIÓN				
EVALUACIÓN TÉCNICA				
GENERACIÓN INFORME TÉCNICO FINAL				
RETROALIMENTACIÓN IA				

Figura 6.16: Evaluación y retroalimentación. Elaboración propia.

La retroalimentación al modelo de IA es esencial para mejorar continuamente el proceso de predicción y debe completarse antes de que se consideren otros ajustes al sistema. Este proceso de análisis se estima en aproximadamente 1 mes, para cada vez que se realiza un cambio de bomba.

6.6.2. Ejecución del Mantenimiento Predictivo

Esta fase comprende las acciones realizadas en campo para llevar a cabo el reemplazo o ajuste de la bomba antes de que ocurra una falla. Los pasos son:

1. **Recepción** de la alerta de falla, donde el equipo de mantenimiento recibe una alerta de nivel 3 (mantenimiento inmediato), indicando la necesidad de realizar una intervención programada, ya que la bomba fallaría dentro de las próximas 24 horas.
2. **Preparación** para la intervención, se movilizan los recursos necesarios (nueva bomba, grúa pluma, camión aljibe) al lugar de la EDS afectada. Además se verifica que los permisos necesarios para la intervención estén en orden y que las condiciones de seguridad estén garantizadas.
3. **Cambio de la bomba**, el equipo técnico procede a extraer la bomba antigua del pozo utilizando la grúa pluma. Se instala la nueva bomba, asegurando que los parámetros de instalación cumplan con las especificaciones técnicas recomendadas (no impactar con las paredes del pozo, considerar la profundidad a la que debe posicionarse la bomba, entre otras). Además se realiza una prueba inicial para confirmar que el sistema opera dentro de los rangos normales antes de restablecer las operaciones.

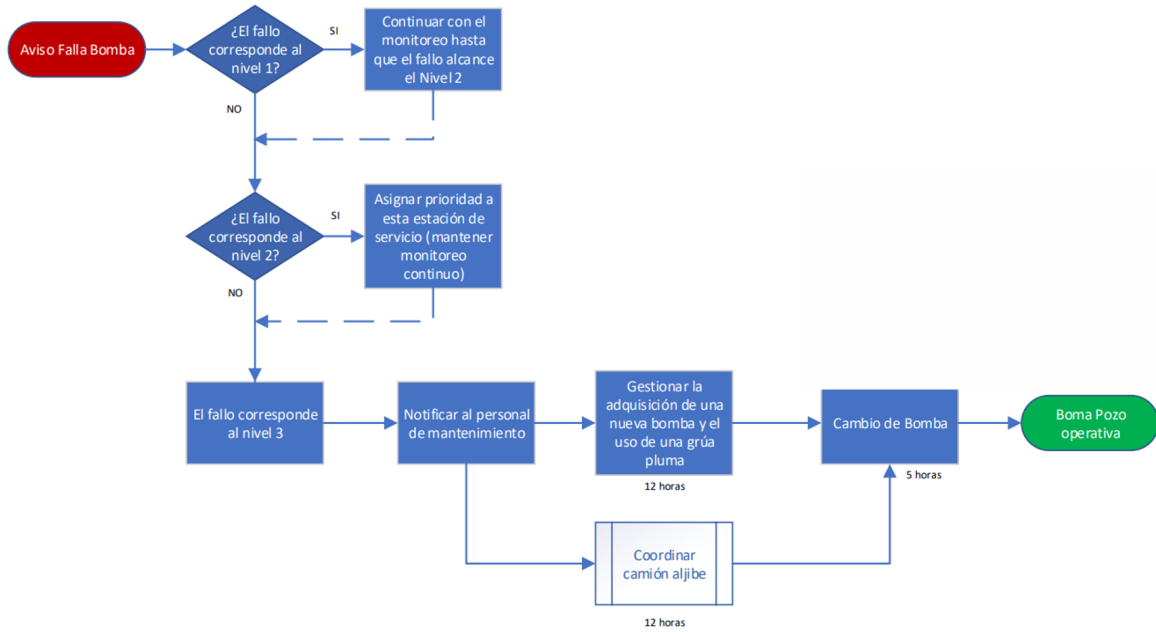


Figura 6.17: Flujograma Aviso Falla a Cambio de Bomba. Elaboración propia

6.6.3. Evaluación y Control del Mantenimiento

Después de ejecutar la intervención, se lleva a cabo una evaluación exhaustiva para medir la efectividad de las acciones realizadas y validar las predicciones del modelo de IA.

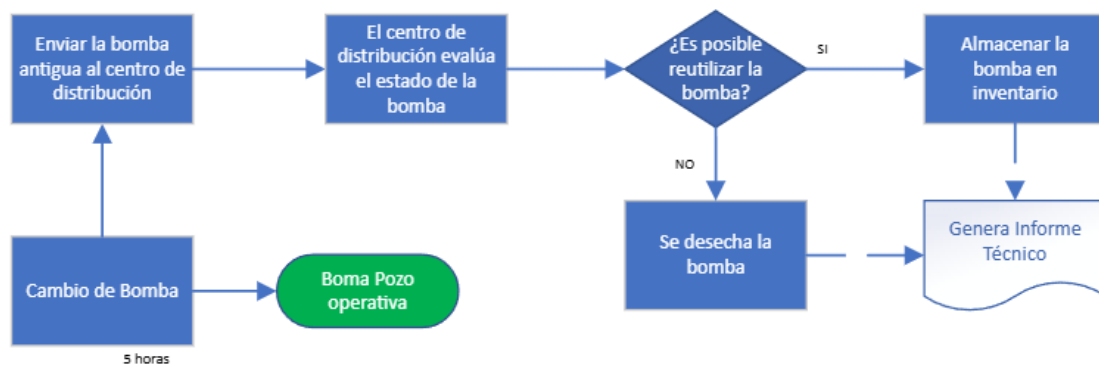


Figura 6.18: Flujograma Evaluación. Elaboración propia

Para realizar el análisis de la bomba retirada, porque actualmente no se cuenta con una estandarización sobre qué hacer con las bombas retiradas, normalmente se dejan en la estación a cargo del concesionario o se botan, se transporta la bomba antigua al centro de distribución que tiene lugar en Santiago, para un análisis técnico detallado. Donde

un especialista evalúa la condición de los componentes principales (rodetes, impulsores, sellos) y determina si el modelo de IA predijo correctamente la falla o si aún existía vida útil en la bomba.

Y se exige la elaboración de un informe técnico el cual debe contener información detallada de la bomba, tal como modos de falla observados, comparación entre la condición real de la bomba y la predicción del modelo.



Figura 6.19: Flujo Proceso Completo. Elaboración propia.

Una vez ejecutadas las tareas, se evalúan los resultados para medir su impacto y detectar posibles desviaciones. Este proceso incluye:

■ **Indicadores de desempeño (KPIs)**

- Tasa de fallos evitados (%), este valor entregará todas las veces que el modelo haya logrado predecir la falla total del equipo.
- Reducción de costos operativos (%), en este caso se debe a la cantidad de camiones aljibes utilizados para rellenar los tanques de acumulación cada vez que fallaba una bombas y así se utilizaba toda el agua de reserva del tanque antes que la EDS se diera cuenta por la falta de agua.
- Disminución de Indisponibilidad de la EDS por la predicción anticipada, por lo tanto se puede cuantificar esta pérdida por indisponibilidad.

■ **Revisión periódica del Modelo IA:** Realizar comparaciones entre las predicciones realizadas y las condiciones reales encontradas durante las inspecciones y análisis técnicos. Y ajuste del modelo en base a la retroalimentación obtenida.

■ **Seguimiento a contratistas:** validación de la información entregada por los mantenedores, además de asegurar el monitoreo de calidad de los trabajos realizados y de los tiempos de respuesta para aportar continuidad operativa al sistema.

6.7. Etapa 7: Ingeniería de Mantenición

Esta etapa tiene como propósito principal analizar los resultados obtenidos tras la implementación del plan de mantenimiento predictivo, evaluando su efectividad y proponiendo mejoras que optimicen tanto los procesos como el desempeño del sistema. Esta etapa no solo busca verificar el cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente, sino también implementar un enfoque de mejora continua que permita ajustar los procedimientos y algoritmos para adaptarse a las condiciones reales de operación y a los desafíos emergentes.

6.7.1. Evaluación de Resultados

El análisis comienza con una revisión exhaustiva de los informes técnicos generados por los especialistas en el centro de distribución, quienes inspeccionan y evalúan las bombas retiradas. Estos informes son esenciales para **determinar la precisión** del modelo de inteligencia artificial (IA), donde se evalúa si las predicciones realizadas por el modelo han sido precisas y oportunas, lo que implica verificar si las fallas anticipadas efectivamente se produjeron dentro del tiempo estimado. También se analiza si hubo predicciones demasiado anticipadas, lo que podría indicar la necesidad de ajustes en los algoritmos.

Además, estos informes entregan información sobre la **clasificación de las bombas retiradas**, ya que estas pueden categorizarse en desecho o reutilización, la primera opción indica que las bombas han cumplido su vida útil y cuya falla predicha fue precisa, validando la eficacia del modelo. Por otro lado, si las bombas aún son funcionales pero fueron retiradas de manera anticipada, se debe señalar que el modelo debe refinar su precisión para maximizar la vida útil del equipo, y una opción que se podría considerar es la reutilización de esta, pero solo serviría en caso de emergencia, ya que el proveedor no asegura su vida útil luego de abrir la bomba para inspeccionarla.

También se debe considerar realizar una **revisión de los modos de falla** identificados durante la evaluación técnica. Este análisis permite detectar patrones no previstos inicialmente y ajustar el modelo para incorporar nuevos factores que puedan estar contribuyendo a las fallas, mejorando así la correlación entre los datos operativos y los resultados del modelo de IA.

6.7.2. Propuestas de Mejora

Durante el análisis del contexto operativo de las bombas sumergibles de pozo y el impacto de su indisponibilidad en las Estaciones de Servicio (EDS), se identificó que una parte significativa del tiempo crítico ocurre en el intervalo comprendido entre el aviso de falla y la llegada de los camiones aljibe para rellenar los tanques de acumulación. Este periodo genera una doble indisponibilidad: por un lado, la bomba de pozo queda

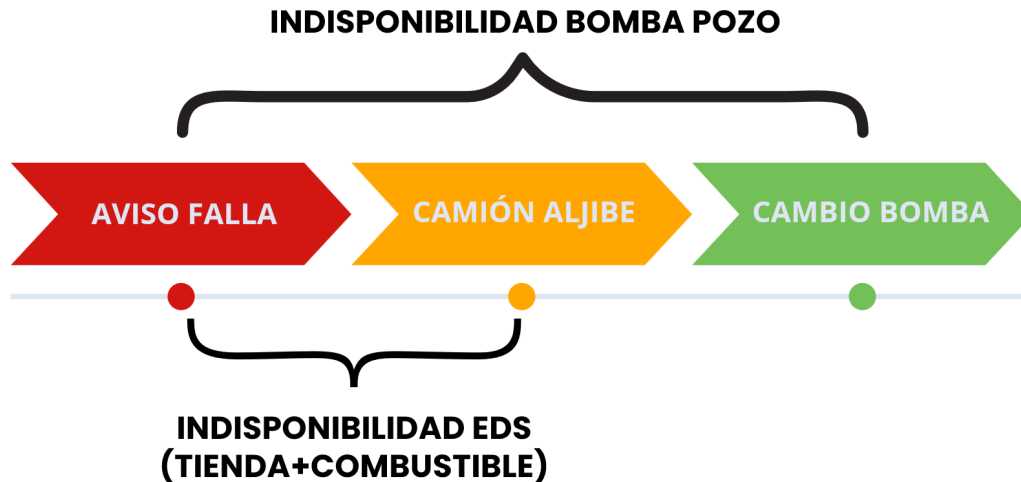


Figura 6.20: Indisponibilidad EDS. Elaboración propia.

fuera de servicio, y por otro, la tienda y las operaciones de la EDS también se ven afectadas debido a la falta de agua en los tanques, como se ilustra en la figura 6.20.

Esta situación plantea una oportunidad para mejorar la capacidad predictiva del sistema al abordar no solo el comportamiento directo de la bomba sumergible, sino también el efecto que tiene sobre el tanque de acumulación. La observación del nivel del agua en este tanque podría convertirse en un indicador adicional para detectar anomalías en el sistema de impulsión antes de que se produzca una falla crítica.

Se propone como una mejora futura, fuera del plan de mantenimiento predictivo propuesto, la instalación de sensores en el tanque de acumulación. Estos sensores podrían proporcionar información clave sobre el nivel de agua en tiempo real, permitiendo la **identificación de déficits** en el suministro, ya que un nivel de agua por debajo del rango normal indicaría una interrupción en el flujo proveniente de la bomba sumergible, lo que podría correlacionarse con un comportamiento anómalo en la bomba.

Por otro lado, al conocer el nivel actual del tanque y la tasa de consumo de agua, se podría estimar el margen de tiempo disponible para realizar el cambio de bomba sin interrumpir completamente las operaciones de la EDS, por lo tanto se contaría con un **tiempo de respaldo** sin la necesidad de la contratación de camiones aljibes o la disminución de su uso.

La integración de estos sensores con el sistema de telemetría actual permitiría una mejora significativa en la capacidad de predicción y gestión del mantenimiento, ofreciendo ventajas como mayor precisión en las alertas, al combinar la información del nivel del tanque con los parámetros monitoreados de la bomba (potencia, caudal y nivel de agua del pozo), se podrían generar alertas más precisas y completas. Además de optimizar el tiempo de respuesta, al contar con un indicador adicional, se dispondría de un tiempo adicional para planificar y ejecutar el mantenimiento, reduciendo el impacto operativo. Y finalmente, la prevención de interrupciones en las operaciones ya que detectar déficits en el nivel del tanque de acumulación antes de que se agote por completo permitiría

mantener la continuidad del suministro y evitar paradas innecesarias.

6.7.3. Estandarización de Procesos

La estandarización es un componente clave para garantizar la eficiencia en la gestión de mantenimiento. Se plantea un enfoque sistemático para unificar la forma en que se gestionan las órdenes de trabajo (OT) y los historiales de las bombas en el sistema SAP.

Para la gestión de las OT en SAP, se propone unificar el formato y contenido de las órdenes de trabajo, asegurando que incluyan información clave del equipo como:

- Nombres estándar para los equipos y tipos de fallas.
- Fecha de instalación y de falla.
- Razones documentadas para el cambio de bomba
- Detalles del modelo y tipo de bomba instalada. Como por ejemplo:



Figura 6.21: Detalle Bomba Sumergible. [19]

Además, se sugiere implementar un registro digital completo para cada bomba, o un historial, incluyendo tiempo total de operación, modos de falla registrados, intervenciones realizadas (incluir fechas), datos relevantes de cada cambio realizado por pozo de las EDS. Este historial servirá como base de datos valiosa para retroalimentar el modelo de IA.

Para optimizar el análisis técnico realizado en el centro de distribución, se propone estandarizar los modelos de bombas sumergibles de pozo utilizados en las diferentes Estaciones de Servicio (EDS). Actualmente, se observa una diversidad de marcas entre las bombas instaladas en las EDS con pozos profundos, lo que complica los estudios técnicos debido a las diferencias en diseño, características y comportamiento operativo.

Si bien cada bomba debe cumplir con especificaciones particulares, como el diámetro y la potencia, según las necesidades específicas de cada estación, la unificación de la marca ofrecería múltiples beneficios. Esta estandarización no solo simplificaría los procesos de evaluación técnica y mantenimiento, sino que también facilitaría la recopilación y análisis de datos, mejorando la consistencia y precisión de los estudios realizados. Además, contribuiría a optimizar la gestión de inventarios, al reducir la variedad de repuestos requeridos, y agilizaría la capacitación técnica al enfocarse en un único estándar de equipo.

6.7.4. Retroalimentación y Optimización

La retroalimentación es un proceso continuo y fundamental para la mejora del sistema. A partir de los datos recopilados y los análisis técnicos realizados, se contempla el **reentrenamiento del modelo de IA** basándose en los patrones de falla recién identificados y los resultados del análisis de las bombas retiradas, el modelo debe ser reentrenado periódicamente para incorporar nuevos datos y ajustar sus algoritmos, reducir el margen de error en las predicciones futuras y adaptarse a condiciones de operación cambiantes, como se muestra en la figura a continuación:

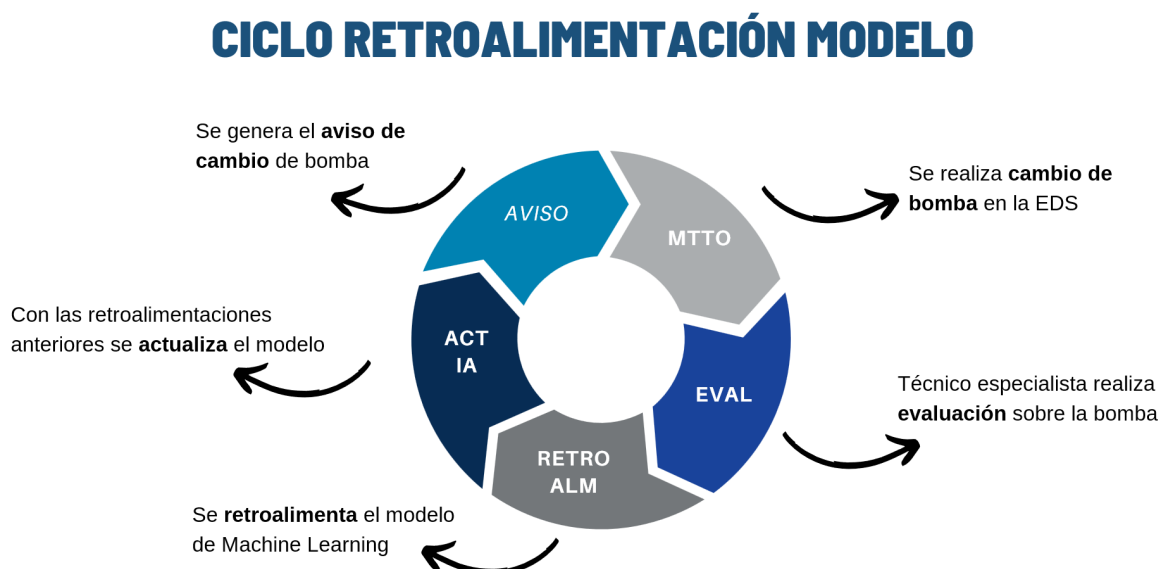


Figura 6.22: Ciclo Retroalimentación del Modelo. Elaboración propia.

Sumado a esto se establece un proceso de reuniones periódicas para analizar los resultados de cada intervención y evaluar su impacto, proponer ajustes al plan de manteni-

miento basados en las lecciones aprendidas y actualizar los procedimientos estándar en función de los nuevos datos y hallazgos.

Este enfoque asegura que las prácticas de mantenimiento evolucionen constantemente, mejorando no solo la eficiencia operativa, sino también la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

6.8. Etapa 8: Análisis del ciclo de vida del activo

La etapa 8 del modelo de gestión de mantenimiento se centra en analizar la viabilidad económica del plan propuesto y comparar los costos asociados al mantenimiento actual (correctivo) con el mantenimiento predictivo. Para ello, se han evaluado todos los factores relevantes, desde los costos de fallas hasta las proyecciones a largo plazo. En esta sección, se explicará detalladamente cada componente del análisis, justificando los cálculos realizados y los resultados obtenidos.

6.8.1. Costos del Mantenimiento Correctivo Actual

El mantenimiento actual, basado únicamente en la corrección de fallas cuando estas ocurren, genera costos significativos debido a la combinación de distintos factores. Los costos por falla se desglosan en los siguientes elementos:

Costo Repuesto	\$ 1.500.000
Costo MO	\$ 200.000
Costo Grúa Pluma	\$ 850.000
Costo Camión Aljibe	\$ 450.000

Tabla 6.18: Costos por falla. Bomba Sumergible

Los **repuestos** incluyen la adquisición de una nueva bomba sumergible para reemplazar la bomba fallida. El costo por **mano de obra** (MO) considera el traslado, la instalación y la puesta en marcha, actividades realizadas por el contratista especializado. La **grúa pluma** es necesaria para la extracción e instalación de la bomba sumergible y el **camión aljibe** es utilizado para rellenar el tanque de acumulación y garantizar el suministro temporal de agua potable, mientras se realiza el recambio de la bomba.

El costo total por falla para el mantenimiento correctivo es de \$ 3.000.000 por evento. Este valor se ha utilizado como referencia para todas las proyecciones utilizadas.

Adicionalmente, se identificaron parámetros clave:

1. **Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF):** se estima en 4 años, basado en los datos históricos de la estación de servicio de prueba.

2. **Número de fallas por año:** calculado como

$$\frac{1}{\text{MTBF}} = 0,25 \text{ fallas/año}$$

3. **Tiempo Medio de Reparación (MTTR):** incluye todas las actividades necesarias para el cambio de bomba, como la recepción del aviso de falla, coordinación logística, la llegada de los equipos y el cambio de bomba, lo cual suma 20 horas.
4. **Tiempo Medio de Pérdida de Producción:** se calcula desde que se da el aviso de falla hasta que el camión aljibe llega a la estación para llenar el tanque de acumulación. Este tiempo es de 12 horas, lo que representa la indisponibilidad operativa de la estación, como se muestra en la figura 6.23 a continuación.



Figura 6.23: Indisponibilidad EDS. Elaboración propia.

El **lucro cesante** asociado a esta pérdida de producción, debido a la urgencia, es de \$ 750.000 por hora, considerando:

- **Indisponibilidad de la tienda:** Se promedia en \$ 660.000 por hora
- **Indisponibilidad del combustible:** calculada en \$ 90.000 por hora, derivada de un consumo promedio de 1.000 litros por hora y un costo marginal de \$ 90 por litro, como se muestra a continuación:

$$\text{Combustible} = 1000 \text{ [L/h]} \times 90 \text{ [CLP/L]} = 90,000 \text{ [CLP/h]}$$

Por lo tanto, si se suman ambos costos por indisponibilidad se tiene que:

$$\text{Costo pérdida de producción por falla} = 660,000 \text{ [CLP/h]} + 90,000 \text{ [CLP/h]}$$

Considerando el tiempo medio de pérdida de producción, 12 horas, se obtiene el costo total de las pérdidas de producción (venta) por falla, que afectan cada vez que se realiza el mantenimiento correctivo actual:

$$750,000 \text{ [CLP/h]} \times 12 \text{ [h]} = 9,000,000 \text{ [CLP]}$$

Sumando el costo del mantenimiento correctivo y la pérdida de producción se obtiene un **costo total por falla** de:

$$3,000,000 \text{ [CLP]} + 9,000,000 \text{ [CLP]} = 12,000,000 \text{ [CLP]}$$

Para que esto quede mas claro, se muestra a continuación una tabla con los valores asociados:

ACTUAL		
CONCEPTO	VALOR	UNIDAD
Costo Mtto Correctivo por falla	3.000.000	CLP/FALLA
Tiempo Medio entre fallas (MTBF)	4	AÑO
Número de fallas por año	0,25	FALLA/AÑO
Tiempo Medio de Reparación (MTTR)	20	HORA
Tiempo Medio Pérdida de Producción	12	HORA
Costo de pérdida de producción por falla	750.000	CLP/HORA
Costos Totales por falla	\$ 12.000.000	CLP

Figura 6.24: Costos Mantenimiento Actual

Se realiza una proyección de costos por EDS a 10 años, donde se observa en la tabla ?? que cada 4 años, dato que se ha obtenido de la investigación de la EDS a prueba, se debe cambiar la bomba sumergible de pozo, lo que significa que cada 4 años, se tendría un costo por falla de 12.000.000 [CLP], es decir, en el año 4 y 8 se visualiza este valor.

Proyección de Costos por EDS										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				\$ 3.000.000				\$ 3.000.000		
				\$ 9.000.000				\$ 9.000.000		
				\$ 12.000.000				\$ 12.000.000		

Figura 6.25: Proyección Costos por EDS Mantenimiento Actual

Para comprender de manera más clara la proyección a 10 años, se puede calcular el costo promedio considerando el número de fallas anuales. En el caso de una sola estación de servicio (EDS), el número de fallas por año es de 0,25, basado en un tiempo medio entre fallas (MTBF) de 4 años. Al extender esta proyección a 10 años, se obtiene un total de 2,5 fallas por EDS.

El costo promedio para una estación de servicio durante este período de 10 años se calcula multiplicando el número de fallas proyectadas (2,5) por el costo total por falla, que asciende a \$12.000.000. Esto nos entrega un costo promedio por EDS de \$30.000.000 en 10 años.

PROYECCIÓN 10 AÑOS		
Cantidad de EDS	Falla por 10 años	Costo Promedio 10 años
1	2,5	\$ 30.000.000
52	130	\$ 1.560.000.000
	TOTAL	\$ 1.560.000.000

Figura 6.26: Proyección 10 años Mantenimiento Actual

Dado que este análisis inicial se basa en un caso de prueba específico, es necesario extrapolar estos resultados para todas las estaciones de servicio que operan con pozos profundos y bombas sumergibles. Actualmente, se cuentan con 52 estaciones de servicio en esta categoría. Siguiendo el mismo enfoque, el número total de fallas en 10 años para estas 52 estaciones se calcula multiplicando las fallas anuales (0,25) por el número de estaciones y los años proyectados:

$$0,25 \text{ [fallas/año]} \times 52 \text{ EDS} \times 10 \text{ [años]} = 130 \text{ [fallas en 10 años]}$$

El costo total para las 52 estaciones de servicio durante este período se obtiene al multiplicar estas 130 fallas por el costo total por falla de \$12.000.000, lo cual nos entrega un monto de \$1.560.000.000. Por lo tanto, el costo total proyectado para todas las estaciones de servicio con bombas sumergibles, utilizando el modelo de mantenimiento correctivo actual, asciende a \$1.560.000.000 en 10 años, como se muestra a continuación:

6.8.2. Costos del Mantenimiento Predictivo Propuesto

Para evaluar la propuesta del plan de mantenimiento predictivo, se debe considerar que algunos costos permanecen constantes con respecto al mantenimiento correctivo actual. Esto se debe a que el mantenimiento correctivo sigue siendo necesario para realizar el cambio de bomba cuando sea requerido. En consecuencia, el costo por falla en cuanto a repuestos, mano de obra, grúa pluma y camión aljibe no varía, manteniéndose en \$3.000.000 por evento.

Sin embargo, el gran beneficio del mantenimiento predictivo radica en la anticipación de las fallas con 24 horas de antelación. Esta mejora permite una gestión más eficiente y coordinada de las actividades necesarias para el recambio de bomba, eliminando completamente el tiempo medio de pérdida de producción asociado al mantenimiento correctivo. En términos económicos, el lucro cesante de \$9.000.000 por falla, correspondiente a 12 horas de indisponibilidad de la estación de servicio (EDS), se reduce a cero en este escenario predictivo.

El mantenimiento predictivo introduce nuevos costos relacionados con la creación y mantenimiento del modelo de inteligencia artificial (IA) necesario para anticipar fallas. Estos costos incluyen:

PROPUESTA		
CONCEPTO	VALOR	UNIDAD
Costo Mtto Correctivo por falla	3.000.000	CLP/FALLA
Tiempo Medio entre fallas (MTBF)	4	AÑO
Número de fallas por año	0,25	FALLA/AÑO
Tiempo Medio de Reparación (MTTR)	20	HORA
Tiempo Medio Pérdida de Producción	0	HORA
Costo de pérdida de producción por falla	750.000	CLP/HORA
Costo Ingeniero Informático	2.000.000	CLP/MES
Costo Mantenimiento del Modelo	1200000	AÑO
Costos Totales por falla	\$ 3.000.000	CLP

Figura 6.27: Costos Plan Mantenimiento Propuesto

- **Creación del modelo predictivo de IA:** donde se requerirán **6 meses** de trabajo exclusivo de un ingeniero infomático especializado. El costo empresa mensual estimado del ingeniero es de \$ 2.000.000, lo que lleva a un costo total del \$ 12.000.000 por la creación del modelo. Este costo se distribuye entre las 52 EDS, para poder visualizarlo en la tabla ??, que está enfocada al costo por estación de servicio, con bomba sumergible resultando en un costo unitario de \$ 230.769 por EDS.
- **Mantenimiento del modelo de IA:** incluye la retroalimentación del modelo basada en los informes técnicos generados tras cada cambio de bomba. Se estima que el ingeniero informático, que se encuentra presente en el área de Data Analytics de la empresa, se dedicará un 5 % de su tiempo semanal (2 horas semanales), con un costo anual de \$ 1.200.000. Este costo también se distribuye entre las 52 EDS, para que se pueda visualizar en la tabla ??, resultando en un costo unitarios anual de \$ 23.077 por EDS.

Al igual que en el caso del mantenimiento correctivo, se realizó una proyección de costos a 10 años para el mantenimiento predictivo, tomando como referencia una EDS de prueba, que incluye:

- **Costo por cambio de bomba:** \$ 3.000.000 por evento, con una frecuencia de falla cada 4 años.
- **Costo de creación del modelo:** \$230.769 por EDS, distribuido en el año cero, debido a que es una inversión solamente, solo dura 6 meses hasta que esté creado.
- **Costo anual de mantenimiento del modelo:** \$23.077 por EDS.

Proyección de Costos por EDS										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				\$ 3.000.000				\$ 3.000.000		
\$ 230.769										
	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077
	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 3.023.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 23.077	\$ 3.023.077	\$ 23.077	\$ 23.077

Figura 6.28: Proyección de Costos por EDS Propuesta de Mantenimiento

Como se mencionó antes, para realizar una comparación de las dos propuestas a nivel macro, se determina el costo total de implementar y operar el plan de mantenimiento predictivo en una EDS durante 10 años, para luego extrapolar la información del ejemplo a las EDS totales que cuentan con sistema de agua potable proveniente de un pozo profundo.

Por lo tanto, se tiene que para una sola EDS, El costo promedio para una estación de servicio durante este período de 10 años se calcula multiplicando el número de fallas proyectadas (2,5) por el costo total por falla, que asciende a \$ 3.000.000. Esto nos entrega un costo promedio por EDS de \$ 7.500.000 en 10 años.

PROYECCIÓN 10 AÑOS		
Cantidad de EDS	Falla por 10 años	Costo Promedio 10 años
1	2,5	\$ 7.500.000
52	130	\$ 390.000.000
Costo Implementación Modelo (creación y mantenimiento)		\$ 24.000.000
	TOTAL	\$ 414.000.000

Figura 6.29: Proyección 10 años Mantenimiento Propuesto

Para las 52 estaciones, esto resulta en un total de:

$$52 \text{ EDS} \times 2,5 \text{ fallas} = 130 \text{ fallas en 10 años}$$

El costo unitario por falla sigue siendo \$ 3.000.000 , por lo tanto el costo acumulado por fallas es:

$$130 \text{ fallas} \times 3,000,000 \text{ CLP/falla} = 390,000,000 \text{ CLP}$$

Adicionalmente, en el plan de mantenimiento predictivo, se deben incluir los costos asociados a la implementación y mantención del modelo de inteligencia artificial. Por lo tanto se debe considerar

$$\text{Costo creación modelo} = 2,000,000 [\text{CLP/mes}] \times 6 [\text{mes}]$$

$$\text{Costo creación modelo} = 12,000,000 \text{ CLP}$$

Y el costo de mantención del modelo el cual tiene un costo de \$ 1.200.000 al año, considerando que se proyectan 10 años, la multiplicación queda de la siguiente manera:

$$\text{Costo Implementación} = 12,000,000 + 1,200,000 \times 10$$

$$\text{Costo Implementación} = 24,000,000 \text{ CLP}$$

Por lo tanto, sumando el costo promedio por 10 años de todas las estaciones y el costo de implementación del modelo se obtiene el total de la proyección de 10 años de la implementación del plan de mantenimiento predictivo, que es igual a \$ 414.000.000.

6.8.3. Comparación de Costos

El análisis de los costos proyectados para los próximos 10 años revela una diferencia significativa entre los dos modelos de mantenimiento evaluados: el correctivo, actualmente empleado, y el predictivo, propuesto como alternativa para mejorar la eficiencia y reducir costos operativos. Este análisis no solo destaca la viabilidad económica del modelo predictivo, sino también su potencial para optimizar los recursos y minimizar las interrupciones operativas en las estaciones de servicio.

MANTENIMIENTO	COSTO 10 AÑOS
ACTUAL (CORRECTIVO)	\$ 1.560.000.000
PROPUESTO (PREDICTIVO)	\$ 414.000.000

Figura 6.30: Comparación ente el mantenimiento Actual y el Propuesto

La Figura 6.30 ilustra visualmente la comparación entre el modelo actual y el propuesto, proporcionando una perspectiva clara de los costos asociados a cada enfoque. En el caso del mantenimiento correctivo, el costo total proyectado asciende a \$1.560.000.000 en un período de 10 años. Este monto incluye los costos derivados de fallas recurrentes, calculados con base en un tiempo medio entre fallas (MTBF) de 4 años y un costo unitario de \$12.000.000 por cada evento de falla, como se detalla previamente en las tablas de proyección. Estas cifras reflejan la carga económica que representa el enfoque reactivo, donde las intervenciones solo ocurren después de que el equipo ha fallado, generando pérdidas operativas significativas y costos elevados.

Por otro lado, el modelo de mantenimiento predictivo, que integra tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, presenta un costo estimado considerablemente menor: \$414.000.000 en el mismo período de 10 años. Este valor incluye los costos de creación del modelo de inteligencia artificial, el mantenimiento anual del modelo y los costos asociados al cambio de bombas.

La diferencia entre ambos modelos se traduce en un ahorro de:

$$1,560,000,000 - 414,000,000 = 1,146,000,000 \text{ CLP}$$

Este ahorro representa una reducción del 73 % en los costos operativos relacionados con el mantenimiento de las estaciones de servicio. Además del impacto económico, este modelo reduce significativamente el tiempo de inactividad no planificado y los costos asociados a interrupciones operativas, lo que a su vez contribuye a mejorar la percepción del cliente y la competitividad de las estaciones de servicio de Copec.

El mantenimiento predictivo no solo optimiza los costos, sino que también introduce un enfoque más proactivo en la gestión de los activos. Al identificar y abordar posibles fallas antes de que ocurran, este modelo permite una planificación eficiente, reduce la dependencia de intervenciones de emergencia y mejora la disponibilidad y confiabilidad de los equipos críticos.

Por lo que se destaca la importancia de la transición hacia un enfoque predictivo no solo por su rentabilidad económica, sino también por los beneficios intangibles asociados, como la continuidad operativa, la mejora en la experiencia del cliente y el fortalecimiento de la sostenibilidad a largo plazo en la operación de las estaciones de servicio.

7. Recomendaciones

Como resultado del análisis realizado y del desarrollo de las etapas del modelo de gestión de mantenimiento, se presentan a continuación una serie de recomendaciones clave que permitirán optimizar aún más el proceso de mantenimiento en las estaciones de servicio (EDS) que cuentan con bombas sumergibles. Estas recomendaciones abarcan aspectos técnicos, operativos y estratégicos, y están alineadas con las necesidades identificadas durante la implementación del modelo de mantenimiento predictivo.

7.1. Estandarización de las Marcas y Modelos de Bombas Sumergibles

Actualmente, las estaciones de servicio utilizan bombas de distintas marcas y modelos, lo que complica el análisis técnico y la gestión de los equipos. Se recomienda estandarizar las marcas y modelos de las bombas sumergibles en función de las especificaciones técnicas más adecuadas para las operaciones de las EDS, como el diámetro, la potencia y la profundidad de instalación.

Esta estandarización facilitará:

- **El análisis técnico:** Reducirá la variabilidad en los modos de falla, simplificando el diagnóstico y permitiendo un mantenimiento más eficiente.
- **La gestión de repuestos:** Al contar con modelos estándar, se pueden centralizar los repuestos en los centros de distribución, mejorando la disponibilidad y reduciendo los costos de inventario.
- **La capacitación técnica:** Los técnicos podrán especializarse en un número limitado de modelos, mejorando la calidad de las reparaciones y reduciendo los tiempos de intervención.

7.2. Estandarización de los Avisos de Fallas

Actualmente, los avisos de fallas en las estaciones de servicio no están uniformemente estructurados, lo que genera retrasos en la búsqueda de información y en la coordinación de los equipos de mantenimiento. Se recomienda estandarizar el formato y contenido de los avisos de fallas, asegurando que incluyan información clave como:

- Fecha y hora del aviso.
- Descripción precisa del problema.

- Parámetros operativos en el momento de la falla (caudal, potencia, nivel de agua, etc.).
- Tiempo transcurrido desde el inicio de la anomalía.

Con esta estandarización se logrará simplificar la búsqueda de fallas, lo que permitirá un análisis más rápido de los incidentes reportados y su relación con patrones históricos de fallas. Además, facilitará la integración con el modelo predictivo, ya que los avisos uniformes podrán ser procesados automáticamente por el sistema de inteligencia artificial para generar alertas más precisas y proporcionar recomendaciones proactivas.

7.3. Optimización de la Información en el Sistema SAP

El sistema SAP utilizado en la gestión de las estaciones de servicio debe enriquecerse con información técnica más detallada y relevante sobre las bombas sumergibles. Se recomienda agregar datos como:

- Marca y modelo del equipo.
- Fecha de instalación.
- Potencia nominal de la bomba.
- Profundidad de instalación.
- Vida útil esperada.

Esto permitirá un monitoreo más preciso, ya que los datos completos y organizados en SAP facilitarán la identificación de patrones de falla y el seguimiento de la vida útil de cada bomba. Además, contribuirá a una mejor planificación del mantenimiento, dado que la información técnica disponible permitirá prever con mayor exactitud los tiempos y recursos necesarios para futuras intervenciones. Por último, fortalecerá la integración con la inteligencia artificial, ya que los datos adicionales en SAP optimizarán la capacidad del modelo predictivo, mejorando sus resultados y la retroalimentación.

7.4. Implementación Temporal de un Mantenimiento Preventivo

Durante el período de transición hacia el modelo de mantenimiento predictivo, se recomienda trabajar de manera preventiva utilizando la vida útil estimada de las bombas sumergibles. Este enfoque permitirá mitigar el riesgo de fallas críticas mientras el modelo predictivo se adapta y alcanza su plena funcionalidad.

El mantenimiento preventivo debe incluir:

- Revisión periódica de los parámetros operativos.
- Sustitución programada de bombas cercanas al final de su vida útil estimada.
- Verificación de los equipos auxiliares, como tanques de acumulación y válvulas.

Este enfoque preventivo garantizará la continuidad operativa, ya que reducirá la probabilidad de fallas inesperadas mientras el modelo predictivo está en desarrollo. Asimismo, asegurará la recopilación de datos de alta calidad, lo que permitirá alimentar el modelo de inteligencia artificial con información real y actualizada, acelerando su proceso de aprendizaje y optimización.

8. Conclusión

El estudio realizado demuestra que la implementación de un modelo de mantenimiento predictivo basado en inteligencia artificial para las bombas sumergibles de agua potable en las estaciones de servicio de Copec es una estrategia altamente eficiente y rentable. Este modelo logra anticipar fallas con suficiente antelación, permitiendo planificar de manera óptima las intervenciones y reduciendo los costos asociados al mantenimiento correctivo actual. Las proyecciones económicas muestran que, a lo largo de 10 años, el mantenimiento predictivo genera un ahorro aproximado de \$1.146.000.000 al considerar el costo unitario de las fallas y la eliminación de las pérdidas por lucro cesante debido a interrupciones operativas.

Desde un punto de vista técnico, el modelo predictivo aprovecha los datos de telemetría ya disponibles en las estaciones de servicio, incluyendo caudal, potencia y nivel del agua, para identificar patrones y comportamientos anómalos que preceden a las fallas. En particular, se observó que el análisis de la potencia de las bombas es clave, ya que esta variable muestra picos significativos en los días previos a la falla, un comportamiento que puede ser modelado y detectado por los algoritmos de inteligencia artificial. Este enfoque no solo asegura la continuidad operativa de las estaciones, sino que también mejora la calidad del servicio al evitar interrupciones prolongadas en el suministro de agua potable.

El análisis económico y técnico incluyó una proyección para 52 estaciones de servicio, con un costo total de mantenimiento predictivo estimado en \$414.000.000 durante 10 años. Este cálculo considera la creación y mantenimiento del modelo de inteligencia artificial, así como los costos de reemplazo de las bombas cada cuatro años. En contraste, el mantenimiento correctivo actual tendría un costo total de \$1.560.000.000 para el mismo período. Estos datos refuerzan la rentabilidad y la sostenibilidad del modelo predictivo, el cual no solo optimiza el uso de recursos, sino que también mejora la eficiencia operativa en toda la red de estaciones.

La propuesta de estandarizar equipos y procesos, incluyendo la unificación de las marcas de bombas y la normalización de los reportes en sistemas como SAP, complementa el modelo predictivo al facilitar la recopilación de datos, mejorar la trazabilidad de las fallas y garantizar la compatibilidad con las herramientas de inteligencia artificial. Estas mejoras organizativas son fundamentales para maximizar los beneficios del modelo y asegurar su correcta implementación en el futuro.

Finalmente, este estudio confirma que la implementación de un modelo de mantenimiento predictivo es factible y altamente beneficiosa. No solo optimiza los recursos económicos y técnicos, sino que también posiciona a Copec como una empresa innovadora y comprometida con la sostenibilidad operativa. Se recomienda iniciar la implementación gradual del modelo, comenzando con estaciones piloto, para validar su efectividad y establecer una base sólida para su expansión a nivel nacional. Esto garantizará no solo la reducción de costos, sino también una mejora significativa en la gestión de activos.

Bibliografía

- [1] AEC, “Mantenimiento,” [En línea]. Disponible en: www.aec.es. [Accedido: ene-2025].
- [2] Cegid, “Mantenimiento Correctivo,” [En línea]. Disponible en: www.cegid.com. [Accedido: ene-2025].
- [3] IBM, “Mantenimiento Preventivo,” [En línea]. Disponible en: www.ibm.com. [Accedido: ene-2025].
- [4] Iberdrola, “Mantenimiento Predictivo,” [En línea]. Disponible en: www.iberdrola.com. [Accedido: ene-2025].
- [5] Infraspeak, “Mantenibilidad,” [En línea]. Disponible en: blog.infraspeak.com. [Accedido: ene-2025].
- [6] Grant Thornton, “Eficacia y eficiencia: Herramientas básicas en época de crisis,” [En línea]. Disponible en: www.grantthornton.mx. [Accedido: ene-2025].
- [7] IBM, “MTBF,” [En línea]. Disponible en: www.ibm.com. [Accedido: ene-2025].
- [8] TechTarget, “MTTR: Tiempo medio de reparación,” [En línea]. Disponible en: www.techtarget.com. [Accedido: ene-2025].
- [9] Economipedia, “Gestión,” [En línea]. Disponible en: economipedia.com. [Accedido: ene-2025].
- [10] Qualitymant, “¿Qué es un activo en el mantenimiento?,” [En línea]. Disponible en: qualitymant.com. [Accedido: ene-2025].
- [11] R. Valdenegro O., “Diseño de un modelo de mantenimiento de excelencia,” *UTFSM*, Valparaíso, Chile, Apunte de clases, 2021.
- [12] Copec, “Estación de Servicio remodelada,” [En línea]. Disponible en: ww2.copec.cl. [Accedido: 12-nov-2024].
- [13] Copec, “Organigramas y estructura organizacional,” [En línea]. Disponible en: somos.copec.cl. [Accedido: 22-oct-2024].
- [14] Copec, “Nuestra empresa,” [En línea]. Disponible en: ww2.copec.cl. [Accedido: 24-sep-2024].
- [15] Copec, “Estaciones de servicio en Chile,” [En línea]. Disponible en: ww2.copec.cl. [Accedido: 26-sep-2024].
- [16] Clickie, “Visualización de datos operacionales,” [Aplicación en línea, acceso restringido]. Disponible únicamente para cuentas corporativas de Copec. [Accedido: 26-sep-2024].

- [17] Holzapfel, “¿Qué son las bombas de pozo, para qué se usan, y en qué industrias se usan?” [En línea]. Disponible en: holzapfel.cl. [Accedido: 8-oct-2024].
- [18] Bombas de Pozo, “Bombas sumergibles: Qué son y cómo funcionan,” [En línea]. Disponible en: bombasdepozo.cl. [Accedido: 8-oct-2024].
- [19] Hidros, “Stairs Bomba SP150-6 7.5 HP 380V Franklin,” [En línea]. Disponible en: hidros.cl. [Accedido: 17-oct-2024].
- [20] We Techs, “Sistemas de aguas en general: Caracterización de pozos,” Capacitación interna, módulo 1, entregado por Copec, 12-oct-2021. [Acceso restringido].
- [21] We Techs, “Mantenimiento de pozos: Partes críticas y mantenimiento preventivo,” Capacitación interna, módulo 2, entregado por Copec, 14-oct-2021. [Acceso restringido].
- [22] Alfa Laval, “Pump Handbook,” 2nd ed., Alfa Laval, 2002.
- [23] “Troubleshooting,” Practical Pumping Handbook, cap. 11, pp. 182-205.
- [24] I. J. Karassik, “Centrifugal Pump Clinic,” 2nd ed., Revised and Expanded, Taylor & Francis Group, 1989.
- [25] SIHI, “Diseño de bombas centrífugas,” documento técnico, SIHI, consultado: 12-ene-2025.
- [26] L. Bachus y A. Custodio, “Know and Understand Centrifugal Pumps,” Elsevier, 2003.
- [27] F. Chollet, “Deep Learning with Python,” 2nd ed., Manning Publications, 2021.
- [28] Á. Arrieta Martínez, “Desarrollo de la inteligencia artificial: Limitaciones y posibilidades,” Facultad de Ciencias Humanas y Sociales, Universidad de Madrid, 2018.
- [29] R. Vásquez Moreno, “Diagnóstico de fallas mediante inteligencia artificial explicable: Un camino hacia el mantenimiento prescriptivo,” Presentación técnica, 28-oct-2024.
- [30] J. Moubray, “Reliability-Centred Maintenance (RCM): Mantenimiento Centrado en Confiabilidad,” Edición en español, 2nd ed., Industrial Press Inc., 1997.
- [31] Iyer, L. S., Davenport, T. H., & Patil, D. J., “Analytics, Data Science & Artificial Intelligence: Systems for Decision Support,” Pearson Education, 2020.
- [32] Ng, A., “Machine Learning Yearning,” Deeplearning.ai, 2019.
- [33] Van Rossum, G., & Drake, F. L., “Python 3 Reference Manual,” CreateSpace, 2009.

Anexo A: Ficha Técnica BS

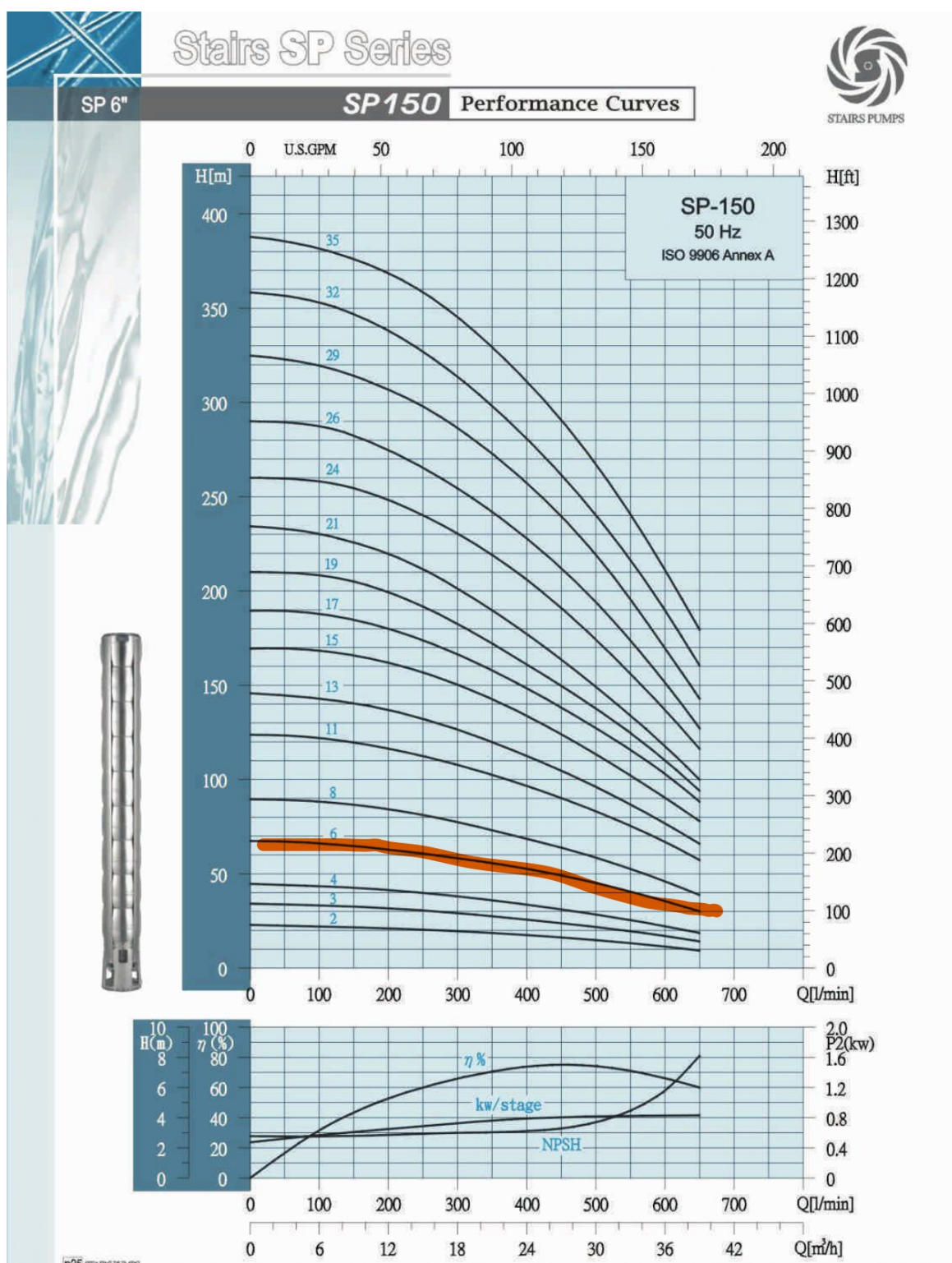
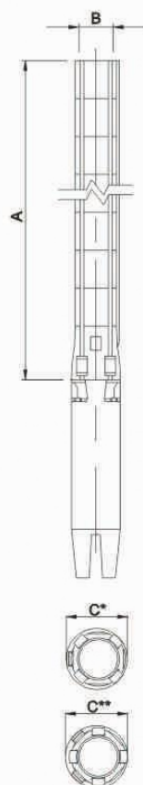


Figura 1: Ficha técnica de la bomba sumergible (SP150).

Selection Chart

Pump Type	Motor		Max.current		m³/h l/min	Q capacity 2900 rpm													
	P2		Amp			6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	
	KW	HP	220V	380V															
SP150-2	2.2	3	9.5	5.5	HEAD IN METERS	23	22	21	20	19	18	17	16	15	13	11	9	6	
SP150-3	3	4	13.3	7.7		33	32	31	30	29	28	26	24	22	20	17	14	11	
SP150-4	3.7	5	15.4	8.9		43	42	41	40	38	36	34	31	28	26	23	19	15	
SP150-6	5.5	7.5	22.2	12.8		67	64	62	60	58	56	52	49	45	40	36	30	25	
SP150-8	7.5	10	28.5	16.5		88	87	84	81	78	73	68	64	58	53	46	38	31	
SP150-11	11	15	41.8	24.2		122	120	117	112	108	102	97	90	83	76	67	57	47	
SP150-13	11	15	41.8	24.2		143	140	137	132	127	120	113	105	97	87	77	66	55	
SP150-15	15	20	55	32		168	166	162	157	150	142	134	124	113	102	90	77	65	
SP150-17	15	20	55	32		188	185	180	173	167	158	148	138	127	116	103	88	71	
SP150-19	18.5	25	69	40		208	205	199	192	182	172	161	150	137	125	110	94	77	
SP150-21	18.5	25	69	40		230	226	220	212	202	190	177	164	149	134	117	100	80	
SP150-24	22	30	81	47		258	254	248	240	230	219	207	191	175	156	137	117	93	
SP150-26	22	30	81	47		287	282	275	266	255	242	227	212	194	173	152	127	100	
SP150-29	26	35	96	56		319	314	307	298	287	273	257	240	220	196	170	143	113	
SP150-32	30	40	111	64		353	347	338	327	313	298	281	261	240	217	190	160	130	
SP150-35	30	40	111	64		382	377	368	358	346	329	311	290	267	240	211	180	148	

*Higher pressure, longer stages pumps up to 54 stages are available on request.



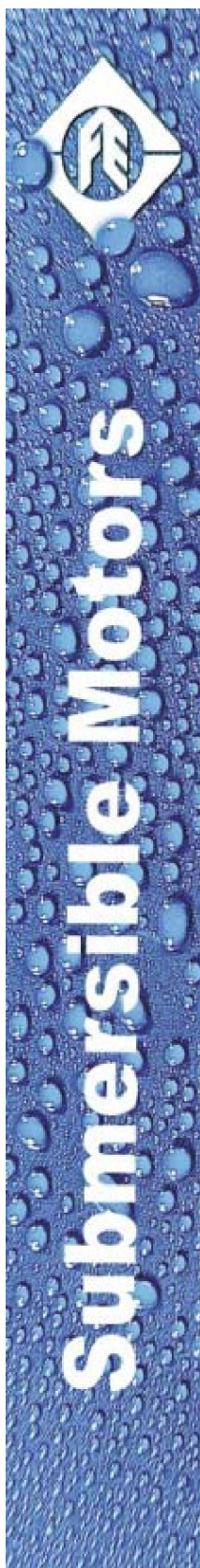
Dimensions And Weights

Pump Type	Dimensions(mm)				Net Weight(Kg) Pump
	A	B	C*	C**	
SP150-2	462	NPT/ RP 3"	131		8.4
SP150-3	558		131		10.1
SP150-4	654		131		11.8
SP150-6	846		131		15.2
SP150-8	1038		142	142	18.6
SP150-11	1326		142	142	23.6
SP150-13	1518		142	142	27.0
SP150-15	1710		142	142	30.4
SP150-17	1902		142	142	33.8
SP150-19	2094		142	142	37.2
SP150-21	2286		142	142	40.6
SP150-24	2574		142	142	45.6
SP150-26	2766		142	142	49.0
SP150-29	3054		142	142	54.1
SP150-32	3342		142	142	59.2
SP150-35	3630		142	142	64.3

C*: Maximum diameter of pump with one motor cable

C**: Maximum diameter of pump with two motor cable

Figura 2: Ficha técnica de la bomba sumergible - Continuación (SP150).



4" Super Stainless 3 ~

SUBMERSIBLE MOTORS

Quality in the Well

Franklin Electric 4" three phase encapsulated Motors, manufactured to ISO 9001 standards, for three phase power supply. The motor offers you a maintenance free long life submersible pump application

MOTORES SUMERGIBLES

Calidad bajo el agua

Motores blindados Franklin Electric de 4", fabricados según la norma ISO 9001 para el servicio a la red de 3 fases. Con estos motores obtiene un accionamiento libre de mantenimiento y de larga vida útil para su bomba sumergible de 4".



Product advantages:

- Hermetically sealed stator. Anti track, self healing stator resin prevents motor burn out
- High efficiency electrical design (low operation cost, cooler winding temperature)
- Removable „Water Bloc“ lead connector
- Cable material according to drinking water regulations (KTW approved)
- Water lubricated radial and thrust bearings
- All motors prefilled and 100% tested
- Non contaminating, water-filled design

Ventajas:

- Estator herméticamente estanco, con resina especial ignífuga.
- Diseño eléctrico de alto rendimiento (bajas temperaturas en los bobinados se traduce en larga vida para el motor)
- Cable de alimentación con conector extraíble Water Bloc™
- Los materiales del cable cumplen normas KTW para agua potable
- Cojinetes radiales y axial lubricados por agua
- Material inoxidable resistente a la corrosión AISI 304 SS
- Todos los motores vienen llenos con líquido y probados al 100%
- Líquido interno no contaminante

Quality
Made by



Franklin Electric



Figura 3: Ficha técnica del motor acoplado (Franklin Electric).

Motor Type	Thrust (N)	Torque (Nm)
Single Phase 1800	~100	~0.25
Single Phase 3000	~150	~0.35
Single Phase 4000	~200	~0.45
Single Phase 6000	~300	~0.65
Single Phase 1500	~150	~0.35
Single Phase 3000	~200	~0.45
Single Phase 4000	~250	~0.55
Single Phase 6000	~350	~0.75
Three Phase 6	~1000	~2.5
Three Phase 6	~1500	~3.5
Three Phase 8	~2500	~6.5
Three Phase 6	~1500	~3.5
Three Phase 6	~2000	~5
Three Phase 8	~3500	~9
Three Phase 10	~5000	~12.5
Rewindable Motors 1800	~1000	~2.5
Rewindable Motors 2700	~1500	~3.5
Rewindable Motors 4500	~2500	~6.5
Rewindable Motors 6000	~3500	~9

- 4" NEMA flange
- Rotation: CCW facing shaft end
- Degree of protection: IP68
- Insulation: Cl. B
- Rated Ambient temp.: 30°C
- Cooling flow: Motors 2,2 kW and up: min. 8cm/sec.
- Starts/h: 20
- Mounting: vertical/horizontal
- Voltage tolerance: +6% / -10% U_N
- Motor protection: Select thermal overloads according to EN 60947-4-1. Trip time <10sec. at 5 x IN

- Motor cable VDE / KTW approved (1,5m; 2,5m; special lengths available)
- Special voltages on request
- Motor complete in AISI 316SS with SiC seal

- Brida NEMA de 4"
- Tipo de protección: IP 68
- Aislamiento: Clase B
- Temperatura ambiental: 30° C
- Arranques por hora: máx. 20
- Posición de montaje: vertical / horizontal
- Tolerancia de tensión: 380V -10%, 415V+6%
- Protección motor: Seleccionar relé térmico según EN60947-4-1.
- Tiempo de disparo < 10s a 5 x I_N
- Velocidad del líquido refrigerante: mínimo 8 cm/s

- Cable de alimentación certificado según normas KTW / VDE. Longitudes estándar de 1,5 m y 2,5 m, sección 4x 1,5 mm². Disponibilidad de longitudes especiales.
- Voltajes especiales bajo petición
- Motor en material especial inoxidable AISI 316SS con retén especial SiC antiarena

Technical drawing of the top view of a 1000 mm x 1000 mm x 100 mm stainless steel tank. The drawing shows a cylindrical tank with a flat top. Key dimensions include: overall diameter of 95.25 mm, top flange outer diameter of 87.32 mm, top flange inner diameter of 87.25 mm, and a central hole diameter of 37.6 mm. The top flange has a height of 1.27 mm. The tank body has a height of 3.42 mm. The bottom flange has a height of 3.18 mm. The tank is shown with a 4.1 mm lead and a 0.75 mm gap. The drawing is labeled "1000 mm x 1000 mm x 100 mm" and "STAINLESS STEEL".

84

Anexo B:Check List Sistema Agua

Check list Agua Potable N° Orden 81849970

Puesto de trabajo: PE03PT01 HIDROCINCO
 Ubicación técnica: C-E-13-JA-60721-SB-SB SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE - OTROS
 SERVICIOS
 Equipo:
 Fecha Check list: 15.10.2024

General

001. Medidor Caudal NO APLICA
 002. Pintura Equipos BUEN ESTADO
 003. Orden y limpieza de la sala BUEN ESTADO
 Observaciones Se realiza limpieza y retiro de polvo en equipos de sala de bomba

Tablero

004. Verificar parámetros tablero eléctrico BUEN ESTADO
 (corriente, voltaje, luces y protecciones)
 Observaciones Tablero eléctrico intervenido por empresa externa

Hidroneumatico

005. Verificar funcionamiento, parámetros BUEN ESTADO
 electricos y mecánicos de las bombas
 Observaciones Amperaje bomba N1 #12.5 - 13.1 - 12.7 #Amperaje bomba N2 #12.8 - 12.3 - 12.5
 006. Estado cilindros (verifica aire y ESTADO REGULAR
 membrana)
 Observaciones Membrana de cilindro N1 mala se sugiere su cambio
 007. Estado del presostato y manómetro BUEN ESTADO
 008. Verificar líneas de impulsión a suministro BUEN ESTADO
 y asperación desde estanques

Cloro

009. Revisar funcionamiento,parámetros BUEN ESTADO
 electricos y mecánicos de bomba cloro y
 accesorios
 010. Verificar que realmente esta efectuando BUEN ESTADO
 dosificación
 011. Verificar correcta activación de bomba BUEN ESTADO
 cloradora



Figura 5: Check list de mantenimiento preventivo del sistema de agua.

Check list Agua Potable N° Orden 81849970

Puesto de trabajo: PE03PT01 HIDROCINCO
 Ubicación técnica: C-E-13-JA-60721-SB-SB SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE - OTROS
 SERVICIOS
 Equipo:
 Fecha Check list: 15.10.2024

012. Cantidad de reactivo entregado BUEN ESTADO
 (hipoclorito de sodio 10%)

L 50

013. Medición de cloro libre a la salida de la BUEN ESTADO
 línea

014. Estado del depósito acumulador de BUEN ESTADO
 Cloro

Pozo Profundo

015. Verificar parámetros tablero BUEN ESTADO
 eléctrico(corriente,voltaje,luces y protecciones)

Observaciones 380v

016. Verificar correcto funcionamiento, BUEN ESTADO
 parámetros electricos y mecánicos de la
 bomba

Observaciones Amperaje bomba pozo #2.1 - 2.2 - 2.1

017. Estado de la Línea de impulsión BUEN ESTADO

Estanque Acumulación

018. Estado de Válvulas (solenoide, flotador, y BUEN ESTADO
 retención) e interruptores de ni

019. Limpieza de estanque (sedimentos al ESTADO REGULAR
 interior)

Observaciones Se sugiere limpieza de estanque de estanque primario

020. Ventilaciones protegidas BUEN ESTADO

021. Estado de las tapas BUEN ESTADO

022. Estado de la Líneas de impulsión, BUEN ESTADO
 aspiración



Figura 6: Continuación Check List

Anexo C: Estudio Potencia Telemetría

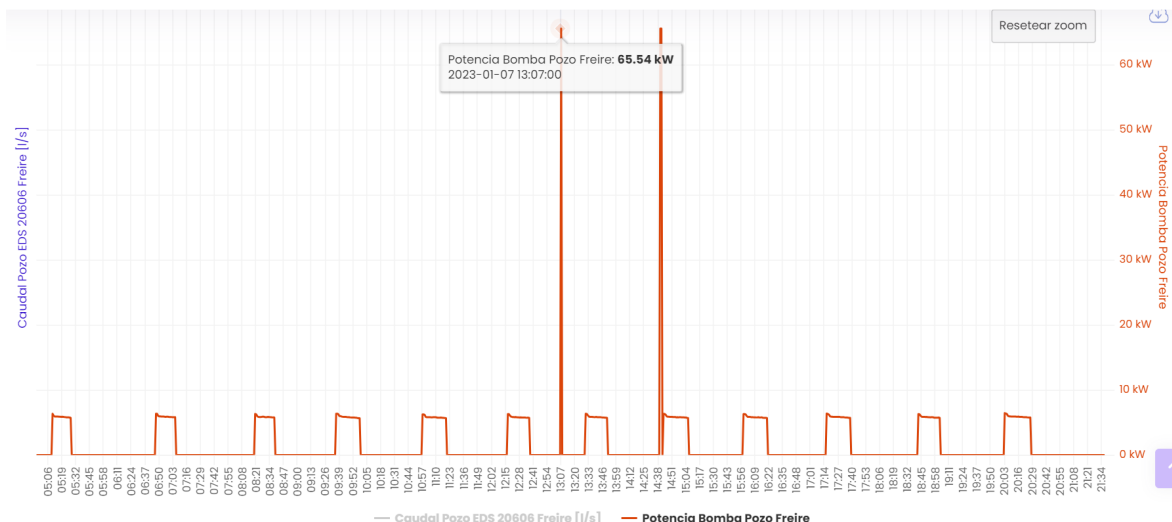


Figura 7: Peak Potencia Bomba Sumergible