

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA INCREMENTAR
LA DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS EN UNA EMPRESA DE MANTENIMIENTO
NAVAL**

**JOSE HENRY ESCOBAR QUINTERO
DANIELA DE JESUS FONSECA BETTIN
MARIA JOSE JIMENEZ DE LA OSSA**

PROYECTO FINAL

ING. RENÉ AMAYA MIER, Ph.D.

DIRECTOR

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISION DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA
2025**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. CAPITULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	3
1.1. ANTECEDENTES.....	3
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2.1. Diagrama Causa – Efecto	6
1.2.2. Diagrama Medios – Fines.....	7
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.4. OBJETIVOS.....	11
1.4.1. Objetivo general	11
1.4.2. Objetivos específicos.....	11
1.5. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	12
1.5.1. Diagnóstico del estado actual	12
1.5.2. Técnicas e instrumentos.....	12
1.5.3. Definición de criterios técnicos	13
1.5.4. Diseño del sistema de control y seguimiento	13
1.5.5. Validación.....	13
1.6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	13
1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES	14
2. CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1. MARCO DE REFERENCIA	16
2.1.1. Marco teórico.....	16
2.1.2. Marco conceptual	17
2.1.3. Marco legal	17
2.2. Estado del arte	18
3. CAPITULO III. DESARROLLO CONCEPTUAL DEL DISEÑO PROPUESTO.....	22
3.1. Diseño Conceptual	22
3.2. AS – IS	22
3.3. TO – BE	24

3.3.1. Formatos de control	27
3.3.2. Definición de frecuencias	27
3.3.3. Sistema de alertas	29
4. CAPITULO IV. ACCIONES DE MEJORA PROPUESTAS Y ANÁLISIS.....	31
4.1. Alternativa 1: Implementación gradual con herramientas digitales básicas	31
4.2. Alternativa 2: Implementación integral con sistema digital automatizado	32
4.3. Alternativa 3: Implementación con software especializado.....	33
5. CAPITULO V. ANÁLISIS DE VIABILIDAD DEL DISEÑO PROPUESTO.....	35
5.1. Evaluación técnica.....	35
5.1.1. Situación actual (diagnóstico)	35
5.1.2. Objetivo técnico del proyecto.....	35
5.1.3. Descripción general de las alternativas.	36
5.1.4. Criterios de evaluación técnica.....	37
5.1.5. Evaluación técnica - análisis comparativo.....	38
5.1.6. Resultados de la simulación práctica de mantenimiento programado.....	40
5.1.7. Valoración técnica del proyecto	41
5.1.8. Riesgos técnicos y controles.....	41
5.2. Evaluación financiera.....	42
5.2.1. Alternativa 1: Implementación con herramientas básicas digitales.....	44
5.2.2. Alternativa 2: Implementación integral con sistema digital automatizado	46
5.2.3. Alternativa 3: Implementación de un Software CMMS Profesional.....	48
5.2.4. Comparación entre las tres alternativas	52
5.2.5. Análisis final y selección de alternativa	53
CONCLUSIONES.....	54
REFERENCIAS.....	56
ANEXOS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama de causa - efecto</i>	6
Figura 2 <i>Diagrama de medios - fines</i>	7
Figura 3 <i>Cronograma de actividades</i>	14
Figura 4 <i>Diagrama AS - IS</i>	24
Figura 5 <i>Diagrama TO - BE</i>	26
Figura 6 <i>Formato de control de herramienta y equipos</i>	27
Figura 7 <i>Cuadro de materiales y frecuencias</i>	28
Figura 8 <i>Notificación de alerta de mantenimiento</i>	30

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Tabla de implementos y cantidades</i>	8
Tabla 2. <i>Costos de mantenimiento por ítem (Último mes)</i>	9
Tabla 3 <i>Tabla de registro de fallas (Últimos 3 meses)</i>	23
Tabla 4 <i>Parámetros claves a inspeccionar</i>	29
Tabla 5 <i>Criterios automáticos para alertas</i>	29
Tabla 6 <i>Criterios y pesos asignados</i>	38
Tabla 7 <i>Evaluación comparativa de las alternativas</i>	39
Tabla 8 <i>Indicadores técnicos estimados antes y después de la alternativa 2</i>	40
Tabla 9. <i>Riesgos técnicos y controles</i>	41
Tabla 10. <i>Reducción de fallas estimadas con base en la literatura</i>	43
Tabla 11. <i>Costos alternativa 1</i>	44
Tabla 12. <i>Flujo de caja para alternativa 1 a 5 años</i>	45
Tabla 13. <i>Costos alternativa 2</i>	46
Tabla 14. <i>Flujo de caja para alternativa 2 a 5 años</i>	47
Tabla 15. <i>Comparación económica de las tres alternativas</i>	52
Tabla 16. <i>Cuadro comparativo de las tres alternativas</i>	52

INTRODUCCIÓN

En el entorno industrial y naval, la disponibilidad operativa de los equipos y herramientas de trabajo representa un factor crítico para garantizar la calidad, la continuidad y la puntualidad en la prestación de los servicios. La empresa donde se llevó a cabo este proyecto, ubicada en la ciudad de Cartagena, se dedica a la ejecución de actividades de limpieza industrial, mantenimiento de embarcaciones, preparación de superficies y aplicación de recubrimientos anticorrosivos. En el desarrollo de estas labores, se hace indispensable el uso constante de equipos como bombas neumáticas, mangueras de presión, extractores, espátulas, entre otros implementos que, por su exposición a ambientes exigentes y corrosivos, están sujetos a deterioro acelerado y fallas operativas.

Actualmente, la empresa no cuenta con un plan estructurado de mantenimiento preventivo, por lo que las intervenciones sobre los equipos se realizan únicamente cuando se presentan fallas. Esta estrategia reactiva ha generado consecuencias importantes como el incumplimiento de los plazos pactados con los clientes, el aumento de los costos operativos por reparaciones urgentes o compras imprevistas, y el sobreesfuerzo del personal. Ante esta situación, surge la necesidad de implementar un sistema que permita anticiparse a las fallas, aumentar la confiabilidad de los activos físicos y optimizar la eficiencia de los procesos técnicos.

El mantenimiento preventivo se ha consolidado como una herramienta esencial en la gestión de activos físicos, alineada con los principios de mejora continua y sostenibilidad promovidos por la norma ISO 55001. Su implementación adecuada permite extender la vida útil de los equipos, reducir tiempos muertos, mejorar la planificación de recursos y tomar decisiones

basadas en datos. Este tipo de mantenimiento, cuando se adapta a las condiciones reales de operación, puede generar ahorros significativos y mejorar los indicadores de desempeño técnico.

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo principal diseñar un plan de mantenimiento preventivo para la empresa, que permita clasificar los equipos según su criticidad, establecer frecuencias de revisión, definir hojas de vida técnicas, implementar formatos de control y evaluar diferentes alternativas de implementación. El modelo propuesto busca ser adaptable, escalable y financieramente viable, aportando una solución concreta a una necesidad operativa recurrente y fortaleciendo la gestión estratégica de los activos de la organización.

1. CAPITULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. ANTECEDENTES

Este proyecto se desarrolla en una empresa colombiana fundada a inicios del año 2018, dedicada a prestar servicios industriales especializados, particularmente en el ámbito portuario y naval. Desde su creación, la empresa se ha enfocado en ofrecer soluciones técnicas para la limpieza, inspección y mantenimiento de tanques, estructuras metálicas, embarcaciones y áreas operativas críticas. Sus servicios abarcan operaciones como la limpieza de tanques de agua potable, combustibles, aceites, aguas servidas y lastres, así como bodegas de carga, sentinas, cuartos de máquinas, entre otros espacios de difícil acceso en buques y plantas industriales.

Con el paso del tiempo, la empresa ha ampliado su portafolio de servicios para incluir procesos como la aplicación de pintura industrial, preparación de superficies mediante técnicas como hidroblasting, limpieza mecánica, y el armado y desarmado de andamios. Estas actividades son esenciales para mantener la operatividad de la infraestructura portuaria y garantizar el cumplimiento de los estándares técnicos que exigen sus clientes. A su vez, la empresa ha incorporado tareas como el retiro de lodos, residuos sólidos y líquidos, y la instalación de aislamientos térmicos y acústicos.

El crecimiento de la empresa ha sido impulsado por la demanda constante de servicios industriales eficientes, especialmente en el sector marítimo-portuario de la región Caribe. La atención a clientes de alto requerimiento técnico ha motivado a esta empresa a fortalecer sus capacidades humanas y técnicas, contando actualmente con un equipo capacitado y comprometido con altos estándares de calidad, seguridad industrial y cumplimiento ambiental.

Sin embargo, la empresa, enfrenta actualmente fallas recurrentes e imprevistas en herramientas y equipos, las cuales generan incumplimientos en los plazos de entrega y aumentos en los costos operativos. Esta situación se debe, principalmente, a un plan de mantenimiento reactivo, nada formal y poco estructurado, recurriendo a medidas como la sustitución de equipos defectuosos o el aumento de mano de obra para compensar las deficiencias operativas.

Desde sus inicios, la empresa ha tenido como propósito ofrecer soluciones integrales que respondan a las necesidades específicas de cada cliente. Esta orientación ha permitido establecer relaciones comerciales estables y una reputación favorable dentro de su nicho de mercado. No obstante, este proceso de crecimiento también ha generado la necesidad de adaptarse a entornos más complejos, en los que la eficiencia operativa, la trazabilidad de procesos y la capacidad de respuesta técnica cobran una importancia estratégica cada vez mayor.

Por lo tanto, este proyecto busca reducir las fallas imprevistas mediante el diseño e implementación de un plan de mantenimiento preventivo ajustado al contexto operativo y organizacional de la empresa, con el fin de mejorar la disponibilidad de los equipos, reducir los costos y optimizar la eficiencia de sus servicios.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Esta empresa ubicada en la ciudad de Cartagena, Colombia y dedicada a la prestación de servicios de inspección y limpieza de embarcaciones, aplicación de pinturas y recubrimientos en tuberías, tanques de agua potable, tanques de combustibles, sentinas, entre otros; enfrenta actualmente una problemática operativa que compromete la calidad en la entrega de sus servicios: la ocurrencia constante de fallas imprevistas en equipos e implementos de trabajo.

Estas fallas, al no estar controladas ni previstas por un sistema de mantenimiento estructurado, generan interrupciones en los procesos, afectan la disponibilidad de recursos, y obligan a realizar reemplazos o reparaciones urgentes que incrementan los costos operativos y sobrecargan al personal disponible. En muchos casos, la empresa recurre a la contratación adicional de mano de obra como mecanismo de solución para cumplir con los compromisos adquiridos, lo que representa un uso ineficiente de sus recursos.

La causa de esta situación radica en una gestión de mantenimiento correctiva predominante. Actualmente, los mantenimientos o reparaciones se realizan solo cuando ocurre la falla y los registros de estas se realizan de manera manual, sin trazabilidad técnica ni periodicidad establecida, lo que impide contar con información histórica útil para la toma de decisiones.

Esta problemática se manifiesta en paradas no planificadas, incumplimiento en los tiempos de ejecución de los servicios, insatisfacción de los clientes y pérdida de confiabilidad operativa. Además, pone en riesgo la promesa de valor de la empresa frente a sus clientes y limita su capacidad de competir en un sector donde la disponibilidad de los equipos y la eficiencia en la entrega de servicios son factores determinantes.

En consecuencia, se hace evidente la necesidad de diseñar un modelo de mantenimiento preventivo estructurado, adaptado a las condiciones técnicas, operativas y organizacionales de la empresa. Este modelo debe permitir identificar los equipos críticos, establecer rutinas de inspección y mantenimiento según la frecuencia de uso y tipo de equipo, y definir formatos de control y seguimiento que faciliten una gestión basada en datos reales.

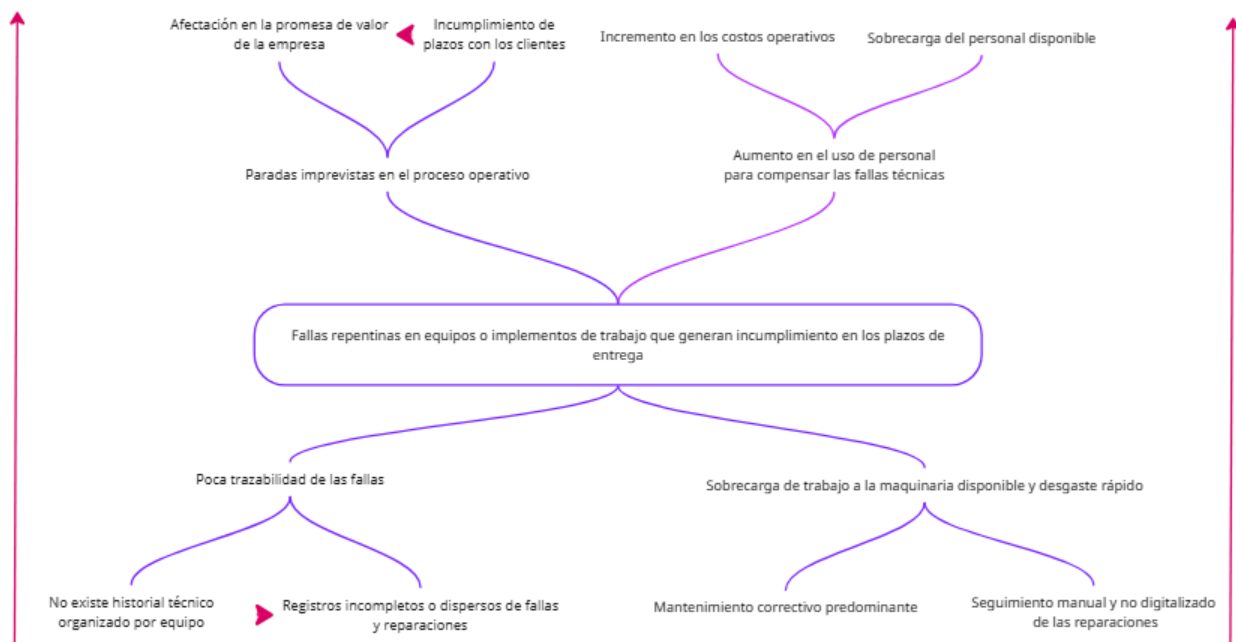
El desarrollo de este proyecto contribuirá directamente a reducir los tiempos muertos, minimizar los costos asociados a fallas operativas y mejorar la eficiencia general de los procesos

de servicio, fortaleciendo la posición competitiva de la empresa y su capacidad para cumplir de manera consistente con los plazos operativos acordados.

1.2.1. Diagrama Causa – Efecto

Figura 1

Diagrama de causa - efecto

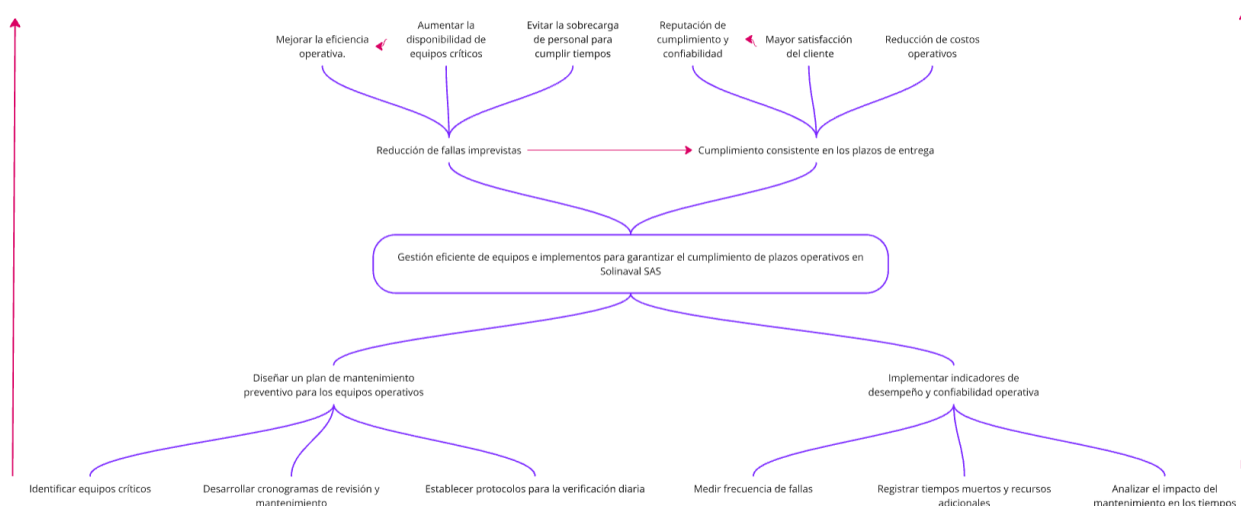


Nota: La figura muestra el problema central de *fallas repentinas en equipos o implementos de trabajo que generan incumplimiento en los plazos de entrega*, de cuya base se desprenden hacia abajo sus causas y hacia arriba sus efectos.

1.2.2. Diagrama Medios – Fines

Figura 2

Diagrama de medios - fines



Nota: La figura muestra el diagrama medios – fines centrados en la gestión eficiente de equipos e implementos para garantizar el cumplimiento de plazos operativos en la empresa, donde en la base se ubican los medios y en la parte superior los fines.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La empresa posee múltiples herramientas en su inventario el cual se lleva de manera manual, este fue digitalizado y en este encontramos herramientas fundamentales para el correcto desarrollo del servicio de extracción de material y pintado. Entre las herramientas encontramos las siguientes:

Tabla 1.*Tabla de implementos y cantidades*

Nombre del artículo	Cantidad	Nombre del artículo	Cantidad	Nombre del artículo	Cantidad
Computadores Portátiles	4	Manguera de oxicorte	5	Pala draga	1
Computador de escritorio	1	Manguera de presión de aire	6	Espátulas	8
Impresoras	2	Reflectores	8	Equipo de aire autocontenido	1
Extractores	2	Pulidora	15	Carretillas	13
Hidro lavadora	6	Ventiladores	6	Extensiones eléctricas	14
Aspiradora	5	Piqueta	18	chalecos	10
Bomba neumática	12	Martillo	7		
Bomba neumática	5	Mona de demolición	12		
Manguera de succión	9	Extintores	8		

Nota. Fuente: Extraído del inventario de la empresa de servicios navales⁰

Cuando un equipo falla la empresa enfrenta problemas serios. Cada vez que pasa esto se necesitan más trabajadores para cumplir con los plazos y eso cuesta dinero. En Colombia para 2025 el salario mínimo es de \$1.423.500 más \$200.000 de auxilio de transporte. Eso suma \$1.623.500 por trabajador al mes. Si se contratan dos operarios extra el costo sube \$3.247.000 por proyecto. Este gasto no está en el presupuesto inicial, por lo tanto, corre por cuenta de la empresa, por lo tanto, las ganancias disminuyen. Si esto continua las pérdidas serán constantes y el negocio se verá muy afectado.

Además, los trabajadores se desgastan. Tienen que esforzarse más y usar los recursos al máximo, lo que también daña la imagen de la empresa. Los clientes notan desorganización o retrasos y todo esto ocurre porque no hay un sistema de mantenimiento preventivo. Solo se arreglan los equipos cuando se dañan, evidenciando un plan de acción, pero no existe un plan preventivo lo cual, provoca fallas repentinas.

Si comparamos el costo de tener estas fallas, frente al costo de mantenimiento, no solo para un solo servicio sino toda la maquinaria que necesita mantenimiento, nos encontramos con lo siguiente:

Tabla 2.

Costos de mantenimiento por ítem (Último mes)

Item	Fallas	Costo Prom. por Falla	Costo Total Fallas	Observaciones
Bomba neumática (2" 1/2)	2	\$ 180.000	\$ 360.000	Requiere mantenimiento correctivo
Bomba neumática (1")	2	\$ 120.000	\$ 240.000	Requiere mantenimiento correctivo
Manguera de oxicorte	1	\$ 100.000	\$ 100.000	Reemplazo
Manguera de succión	1	\$ 24.000	\$ 24.000	Reemplazo
Manguera presión aire	1	\$ 80.000	\$ 80.000	Reemplazo
Reflectores	2	\$ 30.000	\$ 60.000	Requieren repuestos
Extintores	1	\$ 25.000	\$ 25.000	Requiere recarga
TOTAL	10		\$ 889.000	

Nota. Fuente: Extraído de los datos históricos de la empresa de servicios navales

- Costo de mantenimiento: \$ 889.000
- Costo de fallas aproximado por servicio: \$ 3.247.000
- Perdida (diferencia): \$ 2.358.000

Para proyectar estos valores a un marco mensual, se consideró que, en promedio, un mes típico en la empresa. incluye la ejecución de aproximadamente 3 proyectos, basada en datos históricos de operación. Teniendo en cuenta que, según el registro de incidencias, se presentan unas 2 fallas promedio al mes, se calculó el siguiente valor mensual con base en estos parámetros reales y consistentes

- Costo de fallas aproximado mensual: \$6.494.000
- Perdida mensual: \$4.716.000

Al observar la comparación, podemos ver que el costo de la solución sería mucho más rentable a simple vista, dado lo costoso que es la falta de equipos en un servicio. Hay un factor muy importante y es que el costo del mantenimiento inicial será más costoso a los próximos dada la acción correctiva que se debe hacer para poder implementar el plan de mantenimiento, una vez esta acción correctiva se lleve a cabo, el costo de mantenimiento disminuirá y será cada vez más rentable, dado que disminuirán la cantidad de fallas además de la frecuencia de ocurrencia de estas.

La solución es simple. Implementar un plan de mantenimiento preventivo con un sistema de alertas digital. Esto significa revisar los equipos antes de que fallen para evitar gastos extras y mantener todo en correcto funcionamiento. Así se cumplen los plazos, los clientes quedan satisfechos, la rentabilidad incrementara y los trabajadores trabajaran a ritmos más moderados.

Además, como lo afirman Ynzunza et al. (2017), el mantenimiento preventivo es fundamental para aprovechar los beneficios que ofrece la Industria 4.0, ya que permite aumentar la eficiencia y disponibilidad de los activos, alineándose con los principios de modernización tecnológica y gestión inteligente de los recursos.

1.4. OBJETIVOS

En coherencia con la problemática identificada en la empresa, este proyecto plantea un conjunto de objetivos que orientan el desarrollo del trabajo hacia una solución efectiva. A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos que estructuran la propuesta y guían el alcance del modelo de mantenimiento preventivo propuesto.

1.4.1. Objetivo general

Queremos darle a la empresa una solución a medida, un plan de mantenimiento preventivo para sus equipos y herramientas de trabajo. El objetivo central es reducir al mínimo esas fallas inesperadas que a veces complican la entrega a tiempo de los servicios y afectan la eficiencia con la que operan.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los equipos e implementos críticos cuya falla tiene mayor impacto en los tiempos de ejecución de los servicios.
- Diagnosticar las causas recurrentes de las fallas operativas a partir de registros disponibles y entrevistas técnicas.
- Establecer frecuencias de mantenimiento y procedimientos recomendados según el tipo de equipo y su nivel de uso.

- Proponer un modelo estructurado y adaptable de mantenimiento preventivo, que contemple recursos, tiempos, y formatos de control.
- Analizar los beneficios potenciales del modelo en términos de reducción de fallas, tiempos muertos y riesgos económicos para la empresa.

1.5. METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología aplicada en este proyecto se fundamenta en los lineamientos establecidos por las normas ISO 55000 e ISO 55001, orientadas a la gestión estratégica de activos físicos. Estas normas proporcionan el marco para estructurar procesos que permitan maximizar el valor de los activos durante su ciclo de vida, garantizando eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad en su operación. El proyecto se desarrolló siguiendo las siguientes fases metodológicas:

1.5.1. Diagnóstico del estado actual

Se realizó una revisión exhaustiva del estado operativo de los equipos e infraestructura de la empresa, identificando las debilidades relacionadas con el manejo técnico, la trazabilidad, el tipo de mantenimiento predominante y la disponibilidad de los activos. Esta etapa permitió establecer una línea base sobre la cual definir los objetivos de mejora.

1.5.2. Técnicas e instrumentos

Se catalogaron los equipos más relevantes para la operación (bombas neumáticas, hidrolavadoras, mangueras, etc.), con base en su frecuencia de uso, nivel de afectación ante fallas y criticidad dentro del proceso productivo. Esta clasificación permitió priorizar esfuerzos y enfocar el diseño de la solución.

1.5.3. Definición de criterios técnicos

Se establecieron los parámetros que afectan el desgaste y desempeño de los equipos, tales como: Agresividad del material trabajado, el tiempo de almacenamiento sin uso y el número acumulado de operaciones

Con base en estos factores, se definieron las frecuencias técnicas de mantenimiento adaptadas a cada tipo de equipo.

1.5.4. Diseño del sistema de control y seguimiento

Siguiendo el principio de trazabilidad de activos propuesto por la ISO 55001, se desarrolló una herramienta digital en Excel con capacidad de automatización, alertas e indicadores técnicos como: MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio de reparación) y porcentaje de disponibilidad. Esta herramienta permite el registro de fallas, programación de mantenimientos e integración futura a plataformas como Power BI.

1.5.5. Validación

Se aplicaron datos reales y casos representativos para evaluar el comportamiento del modelo, identificar posibles ajustes y validar la efectividad del sistema frente a escenarios de uso intensivo.

1.6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

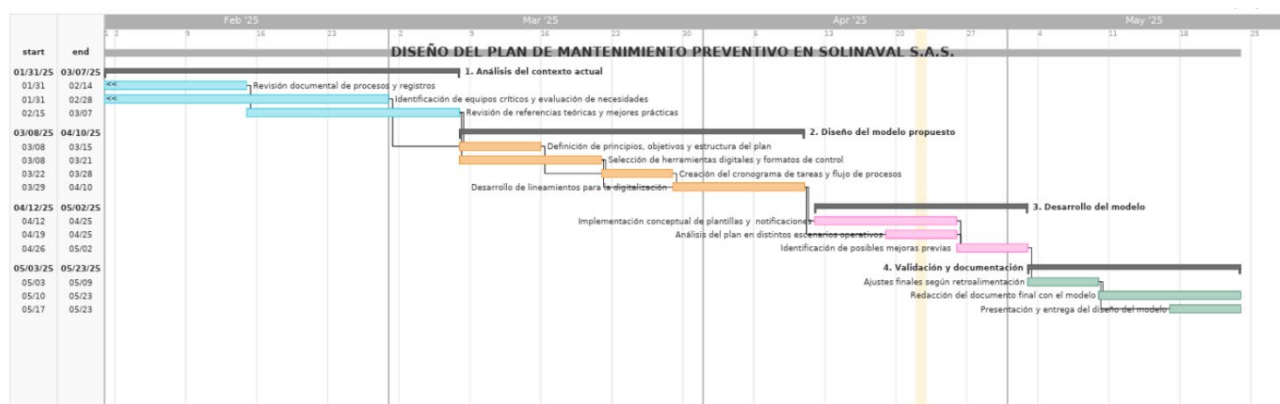
El proyecto está estructurado en cuatro fases principales:

1. Análisis del contexto actual: Incluye revisión del sistema existente, identificación de necesidades y revisión teórica.
2. Diseño del modelo propuesto: Se define la estructura del modelo, herramientas tecnológicas y el flujo de procesos.

3. Desarrollo del modelo: Se implementa el modelo conceptual y se analiza para identificar posibles mejoras.
4. Validación y documentación: Se hacen ajustes finales, se redacta el documento y se entrega el diseño final.

Figura 3

Cronograma de actividades



Nota: Esta estructura organiza el proyecto en cuatro fases secuenciales diagnóstico, diseño, desarrollo y validación.

1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES

Nuestro objetivo principal es crear un plan de mantenimiento preventivo que garantice la mejor disposición de los equipos y herramientas que la empresa lleva a cabo mediante inspecciones, limpiezas industriales y demás servicios relacionados. Nos interesan todos aquellos equipos importantes cuyo posible mal funcionamiento pudiera causar posteriormente retrasos en el plazo de entrega o interrupciones en la continuada actividad. Para ello, las recomendaciones se basan en la determinación de las frecuencias de mantenimiento, los recursos requeridos y aquellos formatos más básicos que pueden favorecer su ejecución. Todo ello en función de las mejores prácticas y del correspondiente análisis técnico de cada equipo de una forma suficiente.

Lo importante a destacar en este sentido es que este proyecto queda limitado a una fase de diseño, planificación, sin llegar al comienzo de la ejecución del modelo. La disponibilidad de la información técnica detallada, de los informes históricos exhaustivos, el control de la información técnicamente, el registro digitalizado de la documentación puede estar muy limitada por lo que la empresa puede tener disponible para aceptar lo que afectaría a la elaboración orgánica inicial que establecimos; y sobre todo no incorporamos el ámbito natural de los aspectos financieros que se pueden dar como contenidos relacionados con la elaboración de la propia gestión de presupuestos o el cálculo exacto de la rentabilidad o retorno de la inversión.

2. CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO DE REFERENCIA

2.1.1. Marco teórico

El mantenimiento preventivo es una estrategia fundamental para garantizar la operatividad y eficiencia de los equipos en ambientes industriales. De acuerdo con la Norma UNE-EN 13306 (AENOR, 2010), el mantenimiento se define como el conjunto de acciones técnicas, administrativas y de gestión destinadas a conservar o restablecer un sistema a un estado en el que pueda cumplir su función.

Entre las estrategias existentes, el mantenimiento preventivo se enfoca en intervenciones programadas antes de que ocurran fallos, permitiendo minimizar el tiempo de inactividad, reducir costos por reparaciones mayores y extender la vida útil de los activos (Thomas & Weiss, 2021).

Una de las metodologías más utilizadas es el Total Productive Maintenance (TPM), que busca maximizar la eficiencia de los equipos involucrando a toda la organización (Pinto et al., 2020). Por su parte, el Reliability Centered Maintenance (RCM) establece prioridades de mantenimiento con base en la criticidad de los equipos, priorizando aquellos cuya falla genera mayores consecuencias (Haris et al., 2021).

Además, se han integrado enfoques como 5S, SMED y Jidoka del sistema Lean Manufacturing al mantenimiento, mejorando no solo la disponibilidad de los equipos sino también la eficiencia en la producción (Flores & Vega-Alvites, 2022).

Los indicadores clave en la gestión del mantenimiento son:

- **MTBF (Mean Time Between Failures):** Mide la confiabilidad del equipo.
- **MTTR (Mean Time to Repair):** Mide la eficiencia en la corrección de fallas.

- **OEE (Overall Equipment Effectiveness):** Evalúa de manera integral la disponibilidad, rendimiento y calidad (Martins et al., 2020).

El uso de herramientas analíticas como cadenas de Markov para la programación del mantenimiento ha demostrado ser efectivo para optimizar los cronogramas y reducir la incertidumbre operativa (Trimarjoko & Romadhon, 2024).

2.1.2. Marco conceptual

- **Mantenimiento preventivo:** Conjunto de tareas planificadas con anticipación para evitar fallas y mejorar la confiabilidad operativa (Maukar et al., 2016).
- **Disponibilidad de equipos:** Proporción de tiempo en la que un equipo está operativo frente al tiempo total disponible (Thomas & Weiss, 2021).
- **Plan de mantenimiento:** Documento estructurado que define qué, cómo, cuándo y quién ejecuta el mantenimiento preventivo (Praharsi et al., 2015).
- **Confiabilidad:** Probabilidad de que un equipo funcione sin fallos durante un periodo determinado bajo condiciones específicas (Martins et al., 2020).
- **Indicadores de gestión:** Métricas como MTBF, MTTR y OEE que permiten evaluar la eficacia del plan implementado (Pinto et al., 2020).

2.1.3. Marco legal

En el contexto colombiano, la gestión del mantenimiento debe alinearse con normativas como:

- **NTC ISO 55000:** Norma internacional para la gestión de activos físicos, que promueve la optimización del ciclo de vida de los activos.

- **NTC ISO 55001:** Norma internacional que establece los requisitos que debe cumplir un sistema de gestión de activos para que sea certificable y funcional.
- **Resolución 0312 de 2019 del Ministerio de Trabajo:** Establece estándares mínimos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), en los cuales se contempla el mantenimiento preventivo como medida para prevenir incidentes y accidentes.

Estas regulaciones promueven la aplicación de prácticas seguras y eficaces para preservar la integridad de los equipos, garantizar la continuidad operativa y proteger al personal.

2.2. ESTADO DEL ARTE

La gestión del mantenimiento en entornos navales y marítimos ha evolucionado desde enfoques correctivos y programados hacia estrategias más inteligentes y orientadas a datos. Diversos estudios muestran cómo la correcta elección de una estrategia de mantenimiento impacta directamente en los costos operativos, la disponibilidad de equipos y la vida útil de los activos críticos, como los que maneja la empresa.

Jambulingam y Jardine (1986) fueron pioneros en demostrar que una planificación adecuada del mantenimiento preventivo permite reducir significativamente los costos de mano de obra y minimizar la frecuencia de intervenciones, utilizando análisis estadísticos como el modelo Weibull. A partir de este enfoque, se consolidó el interés por estrategias programadas que favorezcan la fiabilidad sin recurrir a mantenimientos innecesarios.

Posteriormente, el enfoque evolucionó hacia el mantenimiento basado en condición, como lo exponen Coraddu et al. (2016), quienes aplicaron modelos de machine learning en sistemas de propulsión naval para detectar fallas tempranas y anticipar mantenimientos. Esta técnica redujo

significativamente las interrupciones imprevistas, al permitir la planificación dinámica de las intervenciones técnicas.

El mantenimiento predictivo, sustentado en simulaciones y análisis de datos históricos, también ha mostrado resultados positivos. Martínez (2006) evidenció que, al anticipar fallos por medio de simulaciones tipo Monte Carlo y Weibull, es posible optimizar los ciclos de reemplazo, reducir costos de mantenimiento correctivo y extender la vida útil de los componentes.

Además, estudios recientes han resaltado que la efectividad del mantenimiento preventivo no solo reside en su planificación técnica, sino también en su integración con herramientas digitales y análisis ergonómicos. Holguín-Castro y Real-Pérez (2021) demostraron que, mediante la eliminación de actividades innecesarias y riesgosas en un dique flotante naval, apoyados en análisis ergonómicos (EWA) y una aplicación digital, se logró una reducción del 40% en tareas no esenciales, además de mejoras significativas en la eficiencia operativa y en la seguridad del personal. Aunque no se evidenció una reducción estadísticamente significativa en las fallas imprevistas, el impacto cualitativo en la operación fue claro, lo que refuerza el valor del mantenimiento sistemático más allá de las métricas estrictamente cuantitativas.

De forma complementaria, Sousa et al. (2018) analizaron la gestión de mantenimiento en un entorno portuario en Brasil, utilizando inspecciones periódicas y análisis estadístico para planificar intervenciones. Su estudio demostró que el mantenimiento preventivo se asocia con una mayor confiabilidad de los equipos y que el mantenimiento correctivo, en contraste, tiene un efecto negativo sobre dicha confiabilidad. Los resultados mostraron correlaciones significativas entre la implementación de planes preventivos y la optimización del rendimiento operativo general.

Estrategias más avanzadas incluyen enfoques de optimización conjunta de uso y mantenimiento, como los presentados por Eruguz et al. (2017), quienes utilizaron procesos de decisión de Markov para determinar la política óptima de mantenimiento en activos navales bajo condiciones operativas variables. Sus resultados muestran que una política subóptima puede incrementar los costos hasta en un 27%, lo cual subraya la importancia de integrar herramientas matemáticas en la toma de decisiones.

Goossens (2015) aplicó el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para seleccionar políticas de mantenimiento en flotas navales. Su estudio demostró que la integración de criterios como disponibilidad, seguridad y costos permite una toma de decisiones más robusta y alineada con los objetivos organizacionales.

Además, se destacan estudios que abordan el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en contextos navales (Aleksić & Stanojevic, 2007), y modelos robustos para condiciones de operación incierta (Liu & Frangopol, 2018), en los que se resalta que una estrategia bien planificada puede reducir los costos del ciclo de vida sin comprometer la seguridad ni la operatividad.

A pesar de estos avances, muchas organizaciones aún presentan deficiencias en la estructuración y seguimiento de sus planes de mantenimiento, lo que genera una oportunidad para desarrollar modelos específicos que se ajusten al contexto y necesidades particulares, como el caso de esta empresa, donde se desarrolla este proyecto.

En síntesis, el cuerpo de investigaciones revisado evidencia que las estrategias preventivas, predictivas y basadas en condición, cuando se implementan con soporte analítico, no solo optimizan los costos operativos, sino que fortalecen la confiabilidad del sistema. Estas

conclusiones respaldan el diseño de un modelo de mantenimiento preventivo estructurado como el propuesto en este proyecto, el cual integra elementos como análisis de criticidad, hojas de vida técnicas y frecuencia de intervención, todo alineado con la norma ISO 55001 sobre gestión de activos físicos.

3. CAPITULO III. DESARROLLO CONCEPTUAL DEL DISEÑO PROPUESTO

3.1. Diseño Conceptual

En esta sección se detalla el diseño conceptual del plan de mantenimiento preventivo para la empresa. Este plan se basa en lo estipulado en las normas ISO 55000 e ISO 55001. Se describen las etapas clave y los componentes fundamentales de acuerdo con lo ya establecido en las normas, pero adaptado a las necesidades propias de la operación de la empresa. El diseño conceptual incluye la identificación de los activos de la empresa, el desarrollo de un plan de gestión de activos (recursos, responsabilidades, mantenimientos, mejora continua), la implementación de indicadores y la evaluación de desempeño, así como acciones correctivas.

3.2. AS – IS

Hoy en día la empresa posee una serie de fallas en sus elementos más críticos, dando así margen a que múltiples máquinas de forma simultánea necesiten reparación inmediata.

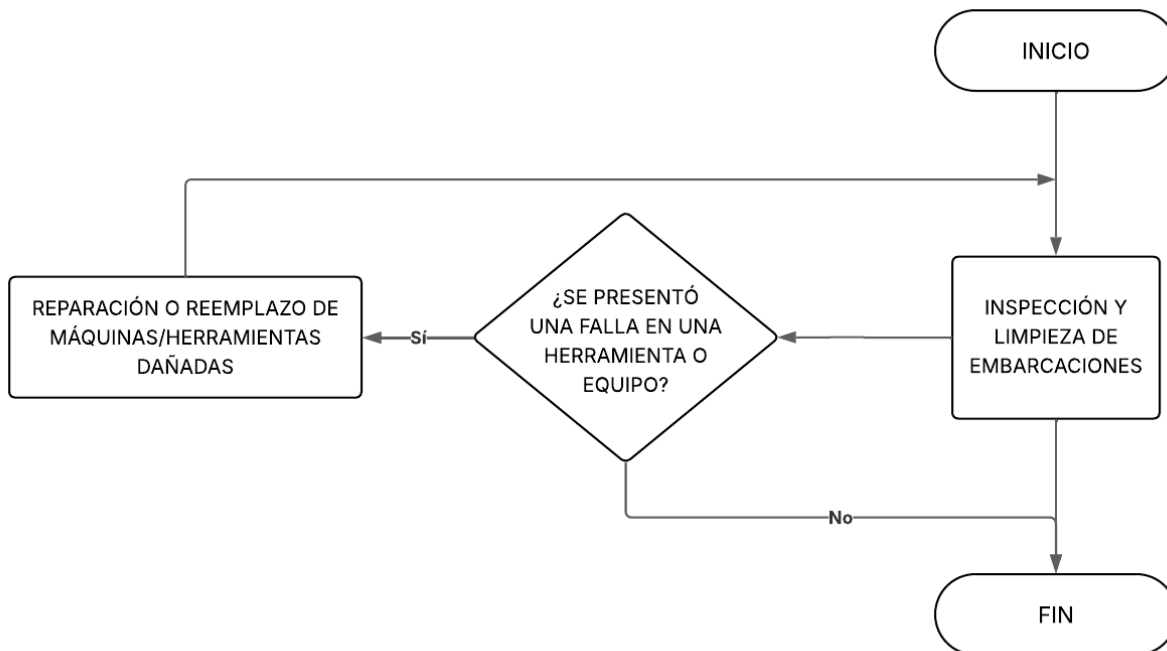
Tabla 3

Tabla de registro de fallas (Últimos 3 meses)

Nombre del Artículo	Fecha de Falla	Descripción de la Falla
Bomba neumática (2" ½)	14/02/2025	Bajo rendimiento, pérdida de presión al iniciar
Manguera de oxicorte	20/02/2025	Fuga detectada en acople intermedio
Extintor multipropósito	22/02/2025	No tenía presión, requiere recarga
Bomba neumática (1")	27/02/2025	Obstrucción en válvula interna, genera ruido excesivo
Manguera de succión (2")	02/03/2025	Grietas visibles, se dobla al usarse con líquidos pesados
Reflectores	04/03/2025	2 reflectores sin bombillos de repuesto
Bomba neumática (2" ½)	15/03/2025	Fuga por conexión inferior (recurrente)
Piquetas	17/03/2025	2 piquetas con mango suelto
Bomba neumática (1")	28/03/2025	Baja presión tras 10 minutos de uso continuo
Extintor multipropósito	02/04/2025	Sello de seguridad roto, requiere inspección
Manguera de oxicorte	05/04/2025	Carbonización leve cerca del cabezal

Nota. Fuente: Extraído de los datos históricos de la empresa de servicios navales

Actualmente, la empresa no cuenta con un plan de mantenimiento preventivo. Realmente, la empresa lleva a cabo son acciones correctivas cuando se presentan fallas o imprevistos con las máquinas o herramientas, generando interrupciones en la operación y retrasos en los tiempos de entrega. A continuación, se muestra un diagrama del proceso actual de la empresa.

Figura 4*Diagrama AS - IS*

Nota: En este diagrama evidenciamos el proceso actual de la empresa, donde se aprecia la falta de planificación de los mantenimientos.

3.3. TO – BE

El escenario ideal que busca la propuesta de un plan de mantenimiento preventivo en la empresa se constituye de la siguiente manera:

Se debe contemplar una orden correctiva para poder tener en perfecto estado todos los equipos antes de implementar el plan de mantenimiento preventivo, dado que la empresa ya cuenta con equipos fuera de funcionamiento

Mediante el formato de control se someterán las piezas a inspecciones leves o meramente visuales las cuales brindarán información sobre el estado de los equipos día a día, además de ser una herramienta fundamental para alimentar la nueva base de datos de los futuros mantenimientos.

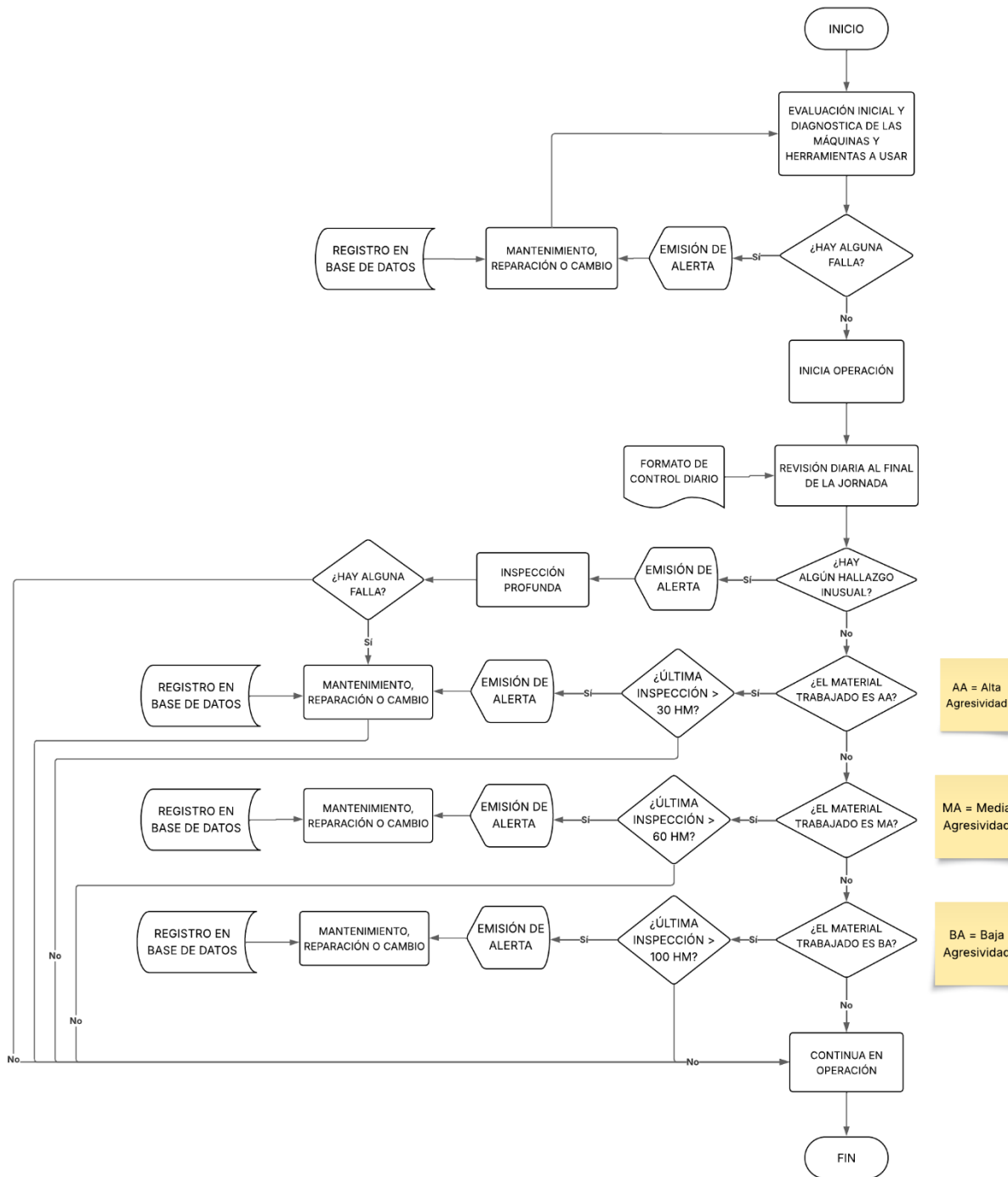
Contare con unas frecuencias de revisión dadas por indicadores claves que me permitan establecer un tiempo adecuado para realizar inspecciones profundas u ordenes de mantenimiento

Un sistema de alertas el cual se verá alimentado tanto por los indicadores como por los formatos de control, permitiendo una planificación de los mantenimientos de manera preventiva.

Con esto se busca lograr una planificación estructurada y fundamentada para cada mantenimiento, un sistema automatizado el cual nos brinde información actualizada, una mayor disponibilidad dado a que disminuirán las fallas, lo que a su vez reducirá la cantidad de operarios extra necesarios, también permitirá contar con una trazabilidad, permitiendo análisis futuros y por último, es muy importante mencionar una reducción de costos junto a una mejora en la imagen y promesa de valor de la empresa.

Figura 5

Diagrama TO - BE



Nota: En este diagrama se muestra el nuevo proceso para el plan de mantenimiento preventivo de la empresa.

1. Resistencia del material trabajado y horas maquina:

Algunos materiales, como arenas con alto contenido salino o sustancias abrasivas, generan mayor desgaste en los equipos. A mayor agresividad del material, mayor será la frecuencia de mantenimiento necesaria. Adicionalmente, las horas de operación son un indicador muy importante que debemos tener en cuenta al momento de la planeación de los mantenimientos de las máquinas y herramientas.

Para esto se requiere un análisis de los materiales manejados con dichas herramientas críticas, tales materiales tienen características y propiedades muy diferentes entre sí, por esto, las clasificamos en 3 categorías, alta agresividad, media agresividad y baja agresividad.

Figura 7

Cuadro de materiales y frecuencias

Actividad / Tipo de tanque	Material movilizad	Clasificación	Frecuencia de revisión (en semanas)	Frecuencia de revisión (En horas)
Tanque de alquitrán	Alquitrán viscoso	Alta agresividad	1	30
Tanque de combustible	Combustible (líquido aceitoso)	Media agresividad	2	60
Tanque de aceite de palma	Aceite vegetal viscoso	Media agresividad	2	60
Tanque de agua potable	Agua limpia	Baja agresividad	3	100
Tanque de aguas negras	Aguas residuales con carga orgánica	Alta agresividad	1	30
Tanque de lodo	Lodo con residuos sólidos	Alta agresividad	1	30
Barrido de arena de sandblasting	Arena residual (abrasiva y seca)	Alta agresividad	1	30
Piqueteo y golpeteo en superficies	Fragmentos metálicos y polvo	Alta agresividad	1	30
Rutina mecánica con pulidora	Polvo metálico y residuos	Media agresividad	2	60
Aplicación de pintura	Pintura líquida o semilíquida	Media agresividad	2	60

Nota: El cuadro dicta el tiempo de revisión dependiendo de la agresividad del material y horas trabajadas.

2. Tiempo de almacenamiento sin uso (reposo):

El tiempo que un equipo permanece sin uso también influye en su estado, ya que la inactividad prolongada puede generar deterioro interno por condiciones como humedad, oxidación o pérdida de presión en los componentes hidráulicos. Se deben tener en cuenta parámetros clave a revisar en ciertos artículos que se desgastan incluso si su uso ha sido el mínimo, tales parámetros como:

Tabla 4*Parámetros claves a inspeccionar*

Elemento	Parámetros de revisión
Bombas	Corrosión interna, sellos, pérdida de presión, engrase
Mangueras	Resequedad, microfisuras, flexibilidad
Válvulas	Obstrucción, corrosión, sellos
Equipos eléctricos	Aislamiento, continuidad, humedad interna

Nota. Parámetros establecidos de acuerdo con las fallas registradas.

Como criterio para el sistema de alerta, estableceremos que el indicador de tiempo almacenado, después de pasado un valor de 30 días generara una alerta para una inspección y pasado un valor mayor a 60 días, generar una orden de alerta para mantenimiento.

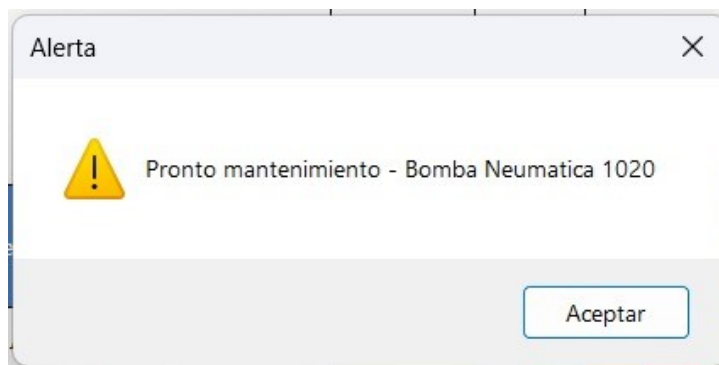
Tabla 5*Criterios automáticos para alertas*

Condición	Acción automática del sistema
>30 días sin uso	Generar alerta para inspección
>60 días sin uso	Generar alerta para mantenimiento

Nota. Días establecidos de acuerdo con las fallas registradas

3.3.3. Sistema de alertas

El sistema de alertas consiste en la herramienta de Excel la cual tiene posibilidades de migrar o exportar reportes a Power Bi, con esta se busca generar notificaciones automáticas para la correcta programación de un mantenimiento preventivo.

Figura 8*Notificación de alerta de mantenimiento*

Esta herramienta nos mostrara el estado de las maquinas, además de generar alertas dependiendo de los indicadores establecidos previamente, estas alertas pueden ser, alerta de inspección profunda: que se puede dar por mucho tiempo de inactividad en los equipos o por consecuencia de una anomalía durante una inspección visual. Por otro lado, también se generará la alerta de orden de mantenimiento: dada por el uso prolongado de un material muy agresivo o por una anomalía encontrada durante una inspección profunda. Este sistema garantiza mayor control, evita improvisaciones y reduce los riesgos de paradas imprevistas.

4. CAPITULO IV. ACCIONES DE MEJORA PROPUESTAS Y ANÁLISIS

Con base en el diseño propuesto en el capítulo anterior, se han definido tres alternativas viables para la implementación del plan de mantenimiento preventivo en la empresa. Cada una considera distintos enfoques en términos de tecnología, recursos humanos y operatividad.

4.1. Alternativa 1: Implementación gradual con herramientas digitales básicas

Esta alternativa propone aplicar el plan de mantenimiento preventivo, detallado en el capítulo anterior, pero teniendo en cuenta solo a los equipos que sean expuestas a materiales de alta agresividad. Adicionalmente, se utilizarán herramientas de bajo costo como hojas de cálculo en Excel, formularios digitales de Google Forms, y almacenamiento en la nube (Google Drive o OneDrive). El seguimiento se hará por el personal operativo, liderado por el supervisor de cada proyecto.

Características:

- Implementación por clasificación: Solo se aplicará el plan de mantenimiento preventivo a las máquinas y herramientas que trabajan con materiales clasificados de alta agresividad.
- Uso de plantillas de control y hojas de vida en Excel.
- Capacitación básica al personal.
- Validación mensual de datos por parte del área administrativa.

Ventajas:

- Bajo costo de inversión.
- Menor curva de aprendizaje para el personal.
- Flexibilidad y rápida puesta en marcha.

Desventajas:

- Mayor dependencia del factor humano.
- Posibilidad de errores en la digitación y seguimiento.
- Limitada automatización y visualización de indicadores.

4.2. Alternativa 2: Implementación integral con sistema digital automatizado

Esta alternativa plantea una implementación integral y simultánea del plan de mantenimiento, detallado en el capítulo anterior, incluyendo todos los equipos desde el inicio. Se utilizarán herramientas de análisis como Excel con macros y visualización de datos mediante Power BI. Se desarrollará un sistema de alertas automatizadas y control centralizado.

Características:

- Aplicación inmediata del modelo completo.
- Automatización de alertas, frecuencias e historial de mantenimientos.
- Integración con sistema de almacenamiento compartido (SharePoint o servidor interno).

Ventajas:

- Mayor confiabilidad en el seguimiento y trazabilidad.
- Reducción significativa de errores humanos.
- Mejora de la toma de decisiones basada en datos en tiempo real.

Desventajas:

- Mayor inversión inicial (capacitación, desarrollo de macros y BI).
- Requiere habilidades técnicas del personal.
- Mayor complejidad operativa.

4.3. Alternativa 3: Implementación con software especializado

Esta alternativa propone adoptar un sistema de gestión de mantenimiento asistido por computadora (CMMS), con un software especializado ya desarrollado con la capacidad de agregar más herramientas o implementos tecnológicos para un mejor análisis de datos. Esta opción permite la digitalización y una mayor gestión integral del mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo.

La empresa adquiriría una licencia comercial o suscripción en la nube y capacitaría al personal para migrar el inventario actual, establecer planes de mantenimiento para cada equipo y realizar el seguimiento digitalizado.

Características:

- Plataforma web o en la nube con acceso desde cualquier dispositivo.
- Cronogramas dinámicos con alertas de mantenimiento por fecha, horas de uso o condición del equipo.
- Control de inventario de repuestos y herramientas.
- Generación automática de indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidad, cumplimiento de mantenimiento, entre otros.
- Módulo de reportes técnicos para toma de decisiones gerenciales.

Ventajas:

- Alta automatización y profesionalismo en la gestión de mantenimiento.
- Mejora en la trazabilidad y control de todos los equipos e intervenciones.
- Reducción de fallas por planificación predictiva y seguimiento en tiempo real.
- Acceso remoto y visualización clara de KPIs.

Desventajas:

- Requiere una alta inversión inicial (licencia y capacitación).
- Dependencia de conexión a internet y soporte técnico del proveedor.
- Curva de aprendizaje inicial para el personal no familiarizado con sistemas digitales.

5. CAPITULO V. ANÁLISIS DE VIABILIDAD DEL DISEÑO PROPUESTO

5.1. EVALUACIÓN TÉCNICA

5.1.1. Situación actual (diagnóstico)

Actualmente, la empresa enfrenta retos importantes en la gestión de sus equipos operativos. La mayoría de las veces (alrededor del 95%), el mantenimiento se hace de forma reactiva, es decir, solo se actúa cuando un equipo falla. No hay registros históricos organizados de las reparaciones, por lo que el equipo depende de la memoria de las personas o de inspecciones visuales para evaluar el estado de las máquinas. Además, no existen procedimientos estandarizados ni un calendario fijo para las revisiones; estas se hacen de manera irregular, según las necesidades del momento o cuando un servicio está en riesgo. Por otro lado, no se miden indicadores clave como el tiempo promedio entre fallas (MTBF), el tiempo promedio de reparación (MTTR) o la disponibilidad de los equipos. Es importante destacar que, en el caso específico de las bombas, que son equipos críticos para la operación, la situación es aún más preocupante. Actualmente, solo 2 de las 17 bombas están disponibles, lo que representa una disponibilidad de aproximadamente el 11.76%. Este dato, evidencia una realidad crítica y subraya la urgencia de abordar las deficiencias en la gestión técnica de los equipos.

5.1.2. Objetivo técnico del proyecto

El proyecto tiene como propósito crear e implementar un sistema de mantenimiento preventivo más organizado, apoyado en herramientas digitales, para prevenir fallas, aumentar la disponibilidad de los equipos y prolongar su vida útil. Este sistema programará los mantenimientos considerando tres factores principales: el tipo de material que procesan los equipos, el tiempo que pasan almacenados sin uso y la cantidad de ciclos de trabajo acumulados. También permitirá medir y seguir indicadores clave como el MTBF, MTTR y la disponibilidad, lo que dará una visión clara

del estado de los equipos y ayudará a tomar decisiones más informadas. Con un sistema de alertas digitales y un panel de control (dashboard), se podrá monitorear en tiempo real el estado de los activos, reducir tiempos de inactividad, mejorar la eficiencia operativa y alinear la gestión técnica con estándares internacionales, como la norma ISO 55000.

5.1.3. Descripción general de las alternativas.

A continuación, una pequeña descripción de las consideraciones técnicas de cada una de las alternativas:

Alternativa 1: Implementación gradual con herramientas digitales básicas

Aplicación inicial del mantenimiento solo en equipos críticos, utilizando herramientas como Excel y Google Forms. Supervisión operativa manual. Es ideal como un plan piloto o etapa inicial, especialmente si la empresa desea validar el impacto del mantenimiento preventivo sin comprometer muchos recursos. Sin embargo, tiene limitaciones en automatización, trazabilidad y confiabilidad

Alternativa 2: Implementación integral con sistema digital automatizado

Aplicación completa del plan desde el inicio, utilizando macros en Excel Power BI y alertas automáticas. Requiere mayor preparación técnica del personal. Representa un punto medio entre costo y efectividad. Es adecuada para empresas que tienen personal con conocimientos básicos/intermedios en herramientas digitales y que desean mejorar la trazabilidad y toma de decisiones con un nivel aceptable de inversión

Alternativa 3: Implementación con software especializado (CMMS)

Uso de una plataforma digital especializada para gestionar todo: los aspectos del mantenimiento (preventivo, correctivo y predictivo), con indicadores avanzados y control remoto. Es la más robusta y sostenible a largo plazo, permitiendo una gestión profesional del mantenimiento. Es ideal si se busca crecer, optimizar recursos y reducir paradas no programadas de forma significativa. Sin embargo, requiere una madurez digital y una inversión importante en tiempo, dinero y capacitación.

5.1.4. Criterios de evaluación técnica

Los criterios clave de evaluación para el proyecto son: automatización, escalabilidad, facilidad de uso, costo de implementación, visualización de KPI's riesgo de errores humanos y dependencia tecnológica.

Estos criterios se seleccionaron porque cubren aspectos esenciales para cualquier proyecto exitoso. La automatización mejora la eficiencia y reduce fallos, la escalabilidad asegura adaptabilidad futura, la facilidad de uso promueve la adopción, el costo de implementación garantiza viabilidad financiera, la visualización de KPI's apoya decisiones informadas, el riesgo de errores humanos busca confiabilidad y la dependencia tecnológica previene interrupciones.

Estos criterios, hacen que el proyecto sea eficiente, adaptable, práctico y sostenible, alineándose con los objetivos. Para realizar la comparación entre las alternativas se les otorgo un peso a cada uno de los criterios, los cuales fueron otorgados de acuerdo con las necesidades y limitaciones de la empresa.

Tabla 6*Criterios y pesos asignados*

Criterio	Descripción	Peso (%)
Automatización	Agiliza procesos y minimiza errores operativos.	15%
Escalabilidad	Permite ampliar el sistema sin rediseños mayores.	15%
Facilidad de uso	Evalúa qué tan intuitivo y accesible es el sistema para el personal.	15%
Costo de implementación	Evalúa si la inversión se ajusta al presupuesto de la empresa.	25%
Visualización de KPIs	Mide la capacidad para generar y mostrar datos útiles para la toma de decisiones.	10%
Riesgo de errores humanos	Evalúa la exposición del sistema a fallas humanas por manipulación manual.	10%
Dependencia tecnológica	Considera los riesgos si falla el proveedor, el sistema o el internet.	10%

Nota. Los criterios y pesos varían de acuerdo con las necesidades y limitaciones de la empresa

5.1.5. Evaluación técnica - análisis comparativo

Para evaluar las alternativas se utilizó una escala cualitativa cuantificada de 1 a 5, donde cada valor representa el desempeño relativo de cada alternativa según criterios específicos. En esta escala, el valor 1 indica el desempeño más bajo o menos favorable, mientras que el valor 5 refleja el desempeño más alto o favorable. Este enfoque permite una comparación clara y estructurada, facilitando la selección de la alternativa más adecuada para optimizar los procesos de mantenimiento en la empresa.

Tabla 7*Evaluación comparativa de las alternativas*

Criterio	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Automatización	0.15	1	3	5
Escalabilidad	0.15	1	3	5
Facilidad de uso	0.15	5	4	2
Costo de implementación	0.25	5	4	1
Visualización de KPIs	0.1	2	4	5
Riesgo de errores humanos	0.1	2	3	5
Dependencia tecnológica	0.1	3	3	1
Total	100%	3	3.5	3.15

Tras aplicar la matriz de evaluación técnica ponderada, se concluye que la alternativa 2: Implementación integral con sistema digital automatizado, representa la opción más adecuada para la empresa. Esta alternativa obtuvo el puntaje ponderado más alto al combinar de forma equilibrada niveles satisfactorios de automatización, escalabilidad, visualización de KPIs y una reducción significativa del riesgo de errores humanos, todo ello con un costo de implementación más accesible en comparación con soluciones más avanzadas como el software CMMS.

Aunque no alcanza el grado de sofisticación de la alternativa 3, la alternativa 2 ofrece una solución técnicamente viable, adaptable a corto y mediano plazo, sin exigir una inversión inicial elevada. Esto permite una modernización progresiva del sistema de mantenimiento preventivo con herramientas ya conocidas por el personal, mejorando la curva de aprendizaje y los recursos existentes.

En consecuencia, se recomienda avanzar con la alternativa 2, considerando que su implementación permite sentar las bases para una futura migración hacia plataformas más avanzadas si la operación así lo demanda

5.1.6. Resultados de la simulación práctica de mantenimiento programado

Teniendo en cuenta que la mejor alternativa para implementar en la empresa es la 2, como siguiente paso en esta evaluación técnica, se realizó una simulación práctica durante un mes, en la que se implementaron las herramientas y estrategias planteadas por la alternativa ganadora, esto nos llevó a realizar un seguimiento diario y un registro detallado de los mantenimientos programados, cumpliendo con los estándares establecidos previamente en dicha alternativa. A lo largo de este período, se observaron consistentemente los siguientes resultados

Tabla 8

Indicadores técnicos estimados antes y después de la alternativa 2

Indicador Técnico	Estado Actual (Estimado)	Con el Proyecto	A futuro (Estimado)
MTTR (h)	72 horas	2,1 horas	2.1 horas
Porcentaje de máquinas Disponibles	11,76%	41,18%	70,6%
Fallas por mes	2	0,5	0.5

Nota. Los valores a futuro, hacen referencia al valor esperado del siguiente mes y fueron extraídos del modelo simulado de la alternativa 2, que se encuentra en los anexos.

Basado en la tabla 8 que muestra los indicadores técnicos estimados antes y después del proyecto (alternativa 2), se puede concluir que esta alternativa trae mejoras significativas. El MTTR (tiempo medio para reparar) se reduce de 72 horas a 2.1 horas, el porcentaje de máquinas

disponibles aumenta de 11.76% a 41.18% inicialmente y se proyecta a 70.6% en el futuro. Además, las fallas por mes disminuyen de 2 a 0.5. Esto indica una mayor eficiencia, disponibilidad y confiabilidad de las máquinas tras implementar la alternativa 2.

5.1.7. Conclusión de la valoración técnica

El proyecto es técnicamente viable con la alternativa 2, ya que contamos con las herramientas necesarias, como Excel y macros, para llevarlo a cabo sin mayores complicaciones. Nuestro equipo tiene las habilidades operativas requeridas, aunque necesitará un pequeño refuerzo en aspectos técnicos básicos. Además, el modelo que proponemos es flexible y puede adaptarse fácilmente si en el futuro incorporamos nuevos equipos o expandimos operaciones a otras sedes, sin necesidad de hacer cambios drásticos. Para mantenerlo en el tiempo, bastará con un seguimiento mensual y una revisión cada seis meses, lo que lo hace sostenible.

5.1.8. Riesgos técnicos y controles

Tabla 9.

Riesgos técnicos y controles

Riesgo Técnico	Impacto	Control Propuesto
Mala diligencia de formatos	Alta	Capacitación inicial + auditorías internas mensuales
Subregistro de fallas	Alta	Registro obligatorio tras cada intervención
Falta de uso del sistema	Alta	Incentivo por uso + responsable técnico asignado
Error de clasificación de materiales	Media	Listado guía + validación técnica

5.2. EVALUACIÓN FINANCIERA

Supuestos generales para el análisis financiero de las alternativas:

- Periodo de evaluación: 5 años
- Tasa de descuento estimada: 10% anual (riesgo medio en pymes de Colombia)
- Costo promedio mensual por fallas: \$6.494.000
- Fallas promedio por mes: 2
- Costo promedio por falla: \$3.247.000
- Reducción de fallas
- Beneficio económico: fallas evitadas x costo por falla

Tabla 10.*Reducción de fallas estimadas con base en la literatura.*

Alternativa	Descripción resumida	Reducción esperada de fallas	Justificación técnica
Alternativa 1	Implementación con herramientas básicas (Excel, formularios)	40% – 50%	Mejora el control manual, pero depende fuertemente de la disciplina del personal y puede haber errores humanos. No tiene alertas automáticas. Basada en experiencias de implementación en pymes y estudios de caso simples (p. ej. Haris et al., 2021).
Alternativa 2	Sistema automatizado parcial (Excel + Power BI + macros)	70% – 80%	Mayor trazabilidad, automatización de alertas y visualización de indicadores. Permite reacción anticipada y seguimiento efectivo. Respaldada por estudios como el de Martínez Rabanales et al. (2024) donde se mejoró el tiempo de respuesta en un 68%.
Alternativa 3	Software especializado (CMMS tipo Fractal, MaintainX)	80% – 90%	Alta automatización, gestión en tiempo real, control de inventario y programación inteligente. Reducción máxima documentada en entornos estructurados. Goossens (2015) y Misson et al. (2023) reportan mejoras entre 80% y 90% en reducción de fallas imprevistas.

5.2.1. Alternativa 1: Implementación con herramientas básicas digitales

Tabla 11.

Costos alternativa 1

Recurso	Cantidad	Valor mensual fijo	Total 5 años
Supervisor de mantenimiento (dedicación al 50%)	1	\$2.500.000	\$150.000.000
Operarios auxiliares para revisiones	2	\$324.700	\$38.964.000
Google Drive (Workspace básico)		\$25.000	\$1.500.000
Licencia de Office (Excel)		\$500.000	\$500.000
Dispositivo tecnológico adicional (tablet o portátil)	1	\$1.200.000	\$1.200.000
Capacitación básica para supervisores y operarios		\$800.000	\$800.000
Costos totales alternativa 1			\$192.964.000

Nota. Los costos son estimados basados en la alternativa 1 y pueden variar según ajustes en la dedicación del personal o licencias tecnológicas.

- Fallas en los 5 años = 120 en promedio (con base en 2 fallas en promedio por mes)
- Reducción del 40%: $0.4 \times 120 \approx 48$ fallas evitadas

Beneficio económico alternativa 1: $48 \times \$3.247.000 = \$155.856.000$

- VAN = -\$74.783.364
- TIR = 1.3%. en este cálculo nos damos cuenta de que es una tasa muy baja y menor a la tasa de descuento, por lo tanto, el proyecto no es rentable.
- ROI = -19.2%.

Con estos valores sacamos la conclusión que, bajo estos datos actuales, VAN negativo, TIR menor al 10%, ROI es negativo, indicando que financieramente, la alternativa 1 no es viable con los costos y beneficios actuales.

Tabla 12.

Flujo de caja para alternativa 1 a 5 años

Año	Costos	Beneficios	Flujo Neto	Factor de descuento 10%	Flujo neto descontado
1	\$38.592.800	\$31.171.200	\$7.421.600	0.91	\$6.746.909,09
2	\$38.592.800	\$31.171.200	\$7.421.600	0.83	\$6.133.553,72
3	\$38.592.800	\$1.171.200	\$7.421.600	0.75	\$5.575.957,93
4	\$38.592.800	\$31.171.200	\$7.421.600	0.68	\$5.069.052,66
5	\$38.592.800	\$31.171.200	\$7.421.600	0.62	\$4.608.229,69

La evaluación financiera de esta alternativa evidencia que, aunque representa la opción más económica en términos de inversión inicial (\$192.964.000 COP), sus beneficios no logran justificar los costos. Con una reducción estimada del 40% de las fallas (equivalente a 48 fallas evitadas), se calculó un beneficio económico de \$155.856.000 COP. Sin embargo, el Valor Actual Neto (VAN) fue de -74.783.364 COP, la Tasa Interna de Retorno (TIR) apenas alcanzó 1.3%, y el Retorno sobre la Inversión (ROI) fue negativo en -19.2%, lo que indica que la alternativa no es financieramente viable bajo los parámetros actuales. Este resultado refleja una alta dependencia del recurso humano y una baja capacidad de automatización, lo que limita el impacto positivo del modelo.

5.2.2. Alternativa 2: Implementación integral con sistema digital automatizado

Tabla 13.

Costos alternativa 2

Recurso	Cantidad	Valor mensual fijo	Total 5 años
Coordinador de mantenimiento digital	1	\$3.000.000	\$180.000.000
Operarios auxiliares para inspecciones y registros	3	\$405.875	\$73.057.500
Power BI (licencia mensual)		\$45.000	\$2.700.000
Licencia de Office 365		\$750.000	\$750.000
Freelancer para desarrollo de macros en Excel		\$1.500.000	\$1.500.000
Desarrollo y configuración del sistema de alertas		\$3.000.000	\$3.000.000
Dispositivo tecnológico adicional (tablet o portátil)	2	\$1.500.000	\$3.000.000
Servidor con suscripción corporativa básica		\$100.000	\$6.000.000
Formación técnica en Power BI y mantenimiento digital		\$2.600.000	\$2.600.000
Guías y manuales impresos		\$400.000	\$400.000
Costos totales alternativa 2			\$270.007.500

Nota. Los costos son estimados para la alternativa 2 e incluyen licencias y dispositivos tecnológicos adicionales, sujetos a variaciones según ajustes en la cantidad de recursos.

- Reducción del 80%: $0.8 \times 120 \approx 96$ fallas evitadas

Beneficio económico alternativa 2: $96 \times \$3.247.000 = \$311.712.000$

- VAN = \$1.181.582.370
- TIR = 83.9%. Un valor considerable bueno que permite un buen retorno financiero, indicando que la inversión es rentable.

- ROI = 15.45%. Por cada peso invertido se espera un retorno en centavos en beneficios completamente netos, e decir una inversión altamente rentable.

Tabla 14.

Flujo de caja para alternativa 2 a 5 años

Años	Costos	Beneficios	Flujo Neto	Factor de descuento (10%)	Flujo neto descontado
1	\$54.001.500	\$311.712.000	\$257.710.500	0.91	\$234.282.272,73
2	\$54.001.500	\$311.712.000	\$257.710.500	0.83	\$4212.983.884,30
3	\$54.001.500	\$311.712.000	\$257.710.500	0.75	\$193.621.713,00
4	\$54.001.500	\$311.712.000	\$257.710.500	0.68	\$176.019.739,09
5	\$54.001.500	\$311.712.000	\$257.710.500	0.62	\$160.017.944,63

Esta alternativa presenta los mejores indicadores financieros del análisis. Con una inversión total de \$270.007.500 COP y una reducción proyectada del 80% en fallas (96 fallas evitadas), se estima un beneficio económico de \$311.712.000 COP. Los resultados financieros fueron altamente favorables: el VAN fue de \$1.181.582.370 COP, la TIR alcanzó 83.9% y el ROI fue del 15.45%. Estos valores muestran que esta alternativa no solo es rentable, sino también escalable y eficiente, permitiendo una gestión más estructurada, automatizada y con mejor trazabilidad de los activos críticos. Se destaca como la opción más sólida técnica y financieramente para la empresa.

5.2.3. Alternativa 3: Implementación de un Software CMMS Profesional

Costos aproximados:

- Suscripciones desde \$40 USD por usuario/mes (ej. Hippo CMMS) hasta \$700 USD/mes (ej. Fractal).
- Implementación y capacitación: variable según proveedor y alcance.

Softwares recomendados:

1. Fractal One: Software CMMS 100% móvil y en la nube, con inteligencia artificial para mantenimiento predictivo.

Características:

- Planificación y ejecución de tareas de mantenimiento.
- Gestión de activos y órdenes de trabajo.
- Integración con sensores IoT.
- Análisis de datos y generación de informes.

Ventajas:

- Predicción de fallos con hasta 80% de precisión.
- Reducción significativa de tiempos de inactividad.
- Ahorro de costos operativos.
- Costo Aproximado: \$700 USD/mes.

2. MaintainX: Software de mantenimiento preventivo y operaciones, con enfoque en movilidad y facilidad de uso.

Características:

- Gestión de órdenes de trabajo y procedimientos.
- Comunicación en tiempo real entre equipos.
- Seguimiento del historial de activos.
- Acceso móvil para técnicos en campo.

Ventajas:

- Interfaz intuitiva y fácil adopción.
- Ideal para equipos distribuidos y operaciones en campo.
- Costo Aproximado: Desde \$16 USD por usuario/mes.

3. Hippo CMMS: Solución todo en uno para gestión de mantenimiento, adecuada para pequeñas y medianas empresas.

Características:

- Programación de mantenimiento preventivo.
- Gestión de órdenes de trabajo y proveedores.
- Acceso a manuales y documentación técnica.
- Mapas interactivos para ubicación de equipos.

Ventajas:

- Personalizable según necesidades específicas.
- Soporte para múltiples instalaciones.
- Costo Aproximado: Desde \$40 USD por usuario/mes.

Como recomendación final de la alternativa 3, se debe tener en consideración las necesidades de la empresa y el objetivo de incrementar la disponibilidad de equipos, en la alternativa 3, entre las opciones analizadas, Fracttal One destaca por su enfoque en mantenimiento predictivo, integración con IoT y presencia en Colombia, lo que facilita el soporte y la implementación. No obstante, si se busca una solución más económica y con rápida adopción, MaintainX y Hippo CMMS son opciones viables que ofrecen funcionalidades robustas y escalabilidad. En el caso de Fracttal One como referencia por ser el más robusto, tenemos lo siguiente.

Supuestos Financieros:

- Software: Fracttal One
- Costo mensual: \$700 USD
- Costo anual: $700 \times 24 = \$16,800$ USD
- Duración del proyecto: 5 años
- Implementación y capacitación inicial: \$5,000 USD
- Ahorro anual estimado (por reducción de tiempos de inactividad, mayor eficiencia): \$8,000 USD en el primer año, aumentando 10% por año.

- Tasa de descuento (para VAN): 10%

Cálculos Financieros:

- Utilizando una tasa de descuento del 10%
- VAN (Valor Actual Neto): -7,254 USD. Esto indica que, descontando los flujos futuros a una tasa del 10%, la inversión genera una pérdida neta en valor presente.
- TIR (Tasa Interna de Retorno): -16.6% no definida (nan). La TIR no se puede calcular porque todos los flujos netos son negativos o no tienen un cambio de signo claro, lo cual impide que exista una TIR válida. Esto refuerza la conclusión de que la inversión no es rentable financieramente bajo estos supuestos.
- ROI (Retorno sobre la Inversión): -22.9%. Por cada dólar invertido, se pierde aproximadamente 22 centavos en este escenario.
- Ahorros totales = \$16.800 USD
- Costos totales = \$21.800 USD

A pesar de sus funcionalidades avanzadas, como mantenimiento predictivo e integración con IoT, la alternativa basada en la implementación de un software especializado como Fractal One resultó no viable financieramente en los escenarios evaluados. Con una inversión total de \$21.800 USD (incluyendo suscripción y capacitación), los ahorros proyectados a 5 años no fueron suficientes para cubrir los costos. El VAN fue -7.254 USD, el ROI fue de -22.9%, lo que indica que por cada dólar invertido se pierde aproximadamente 22 centavos. Aunque técnicamente es robusta, su elevado costo inicial y el bajo retorno en comparación con las otras alternativas, la hacen menos atractiva para la empresa en esta etapa.

5.2.4. Comparación entre las tres alternativas

Tabla 15.

Comparación económica de las tres alternativas

Concepto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Inversión inicial	\$192.964.000 COP	\$270.007.500 COP	\$21.800 USD
Fallas evitadas	48	96	61 aprox
Beneficio total	\$155.856.000 COP	\$311.712.000 COP	\$16,800 USD
VAN (10% 5 años)	\$ -74.783.364 COP	\$1.181.582.370 COP	-\$7,254 USD
TIR	1.3%	83.9%	-16.6%
ROI	-19.2%	15.45%	-22.9%

Nota. El VAN se calculó con una tasa de descuento del 10%, la TIR y el ROI reflejan el rendimiento de cada alternativa. Los valores de la Alternativa 3 están en USD, mientras que las Alternativas 1 y 2 están en COP.

Tabla 16.

Cuadro comparativo de las tres alternativas

Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Inversión inicial	Baja	Media	Alta
Automatización	Limitada	Media	Alta
Escalabilidad	Baja	Media	Alta
Facilidad de uso	Alta	Media	Media
Análisis de datos	Limitado	Media	Avanzado
Integración IoT	No	Posible	Sí
Soporte técnico	No	Interno	Proveedor especializado

Nota. Se establecieron los criterios de acuerdo con las necesidades y limitaciones de la empresa

5.2.5. Análisis final y selección de alternativa

La mejor alternativa a implementar es la número 2 ya que es la que tiene el mejor desempeño financiero global. Esta tiene un mayor VAN, lo que indica que el valor creado neto es el más alto, también tiene un TIR y ROI altos, lo que establece un retorno muy superior al capital de inversión.

Por otro lado, la alternativa número 1, es viable y rentable pero no es la más eficiente. Al tener un VAN positivo, es financieramente aceptable, su ROI y TIR son buenos, pero menores en comparación con los de la alternativa 2, y requiere una menor inversión, podría ser la opción si hay limitaciones de presupuestos.

Por último, la alternativa 3, la cual sería la ideal, según el análisis, no es rentable. Los indicadores del VAN, ROI y TIR, todos son negativos, no hay un retorno positivo para evaluar, lo que indica que el proyecto no es viable financieramente, por lo tanto, se justifica ser descartada en este alcance.

Se selecciona la alternativa 2, esta maximiza el retorno financiero y mejora operativamente de manera significativa.

CONCLUSIONES

La ausencia de un plan de mantenimiento preventivo estructurado en la empresa ha generado un entorno de operación reactiva, lo cual incrementa los costos operativos y el desgaste del personal, afectando negativamente la disponibilidad de los equipos y el cumplimiento de la promesa de valor frente a sus clientes. Esta situación se evidenció mediante el diagnóstico técnico y el análisis de registros de fallas, en donde se identificó una disponibilidad actual de equipos críticos inferior al 12%.

El diseño propuesto de un modelo de mantenimiento preventivo, desarrollado a partir de una metodología mixta (cualitativa y cuantitativa), responde directamente a la necesidad de garantizar la operatividad continua y la trazabilidad de las máquinas y herramientas críticas. Este modelo incluye componentes clave como: hojas de vida técnicas por equipo, sistema de alertas, clasificación por criticidad, definición de frecuencias con base en indicadores técnicos, y formatos de control diario. Todo esto se alinea con las recomendaciones de la norma ISO 55001 sobre gestión de activos físicos.

Se evaluaron tres alternativas de implementación del modelo propuesto:

- Alternativa 1: Implementación básica con herramientas digitales simples (Excel, formularios).
- Alternativa 2: Implementación integral con automatización parcial mediante Power BI y macros.
- Alternativa 3: Implementación mediante un software especializado (CMMS como Fractal o MaintainX).

El análisis técnico-financiero, concluyó que la alternativa 2 representa la mejor relación costo-beneficio, al ofrecer un equilibrio entre inversión razonable, automatización funcional y escalabilidad operativa. Con esta alternativa, se estima una reducción del 80% en fallas, un ROI del 64.8% y un VAN positivo de más de \$16 millones COP.

El modelo propuesto demuestra ser técnica y financieramente viable, adaptable a las capacidades actuales de la empresa, y permite proyectar mejoras significativas en los indicadores técnicos como MTTR y disponibilidad. Además, su diseño flexible facilita una implementación gradual que puede evolucionar hacia soluciones más automatizadas en el futuro.

Desde la perspectiva metodológica y académica, el proyecto aporta una solución concreta y contextualizada a una problemática operativa recurrente, contribuyendo al fortalecimiento de la cultura de mantenimiento preventivo en PYMES del sector industrial y naval. Los hallazgos y herramientas aquí desarrollados pueden ser replicables y escalables a otras empresas con necesidades similares, generando un impacto positivo en la eficiencia técnica, operativa y económica.

Finalmente, se reafirma que el mantenimiento preventivo, cuando es gestionado de forma estratégica, no solo prolonga la vida útil de los activos, sino que incrementa la competitividad, reduce riesgos y facilita la toma de decisiones basada en datos, lo cual es coherente con los principios de mejora continua promovidos por los estándares internacionales de gestión de activos.

REFERENCIAS

AENOR. (2018). UNE-EN 13306: *Terminología del mantenimiento*. Asociación Española de Normalización.

Aleksić, A., & Stanojević, M. (2007). *Reliability-Centered Maintenance for Naval Equipment*. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 10(3), 55–60.

Anchundia-Hidalgo, P. D., Brito-Jordan, D. P., & Castro-Coello, R. L. (2023). *Análisis de la implementación de las cinco fundacionales del pilar mantenimiento planeado del TPM en una industria de producción pesquera*. *MQRInvestigar*, 7(4), 1451–1480.

Campoverde Pillajo, C. D., Loor Espinoza, G. A., & Guevara Molina, P. E. (2024). *Análisis del mantenimiento productivo total (TPM) para la optimización del uso de maquinaria en la industria arrocera: un enfoque estratégico hacia la eficiencia y productividad*. *Arandu UTIC*, 11(2), 1608–1627.

Coraddu, A., Oneto, L., Baldi, F., Anguita, D., & Figari, M. (2016). *Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 136–153.

Eruguz, A. S., Tan, T., & van Houtum, G. J. (2017). *Integrated maintenance and spare ordering policies for fleets with usage-based maintenance*. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 303–316.

Flores, J. C., & Vega-Alvites, M. (2022). *Review Lean Manufacturing Model of Production Management Under the Preventive Maintenance Approach to Improve Efficiency in Plastics Industry SMEs: A Case Study*. *South African Journal of Industrial Engineering*, 33(2), 152–163.

García, F. J. Á., & Salgado, D. R. (2022). *Analysis of the Influence of Component Type and Operating Condition on the Selection of Preventive Maintenance Strategy in Multistage Industrial Machines: A Case Study*. *Machines*, 10(5), 385.

- Goossens, K. (2015). *Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in selecting optimal maintenance strategies for naval vessels*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(3), 306–320.
- Haris, S. T. P., As'adi, M., & Montreano, D. (2021). *Machine Maintenance Planning in Manufacturing Company Using RCM II Methods*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1899.
- Hernández, A., Iparraguirre, D. D., Vega, E., Parimango, L. Y., & Castillo, R. (2020). *Diseño de plan de mantenimiento preventivo, kardex, VSM y balance de línea para reducir costos*. *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología E Innovación*, 7(2).
- Holguín-Castro, J., & Real-Pérez, C. A. (2021). *Mantenimiento preventivo de un dique flotante naval a partir del análisis ergonómico del trabajo y uso de aplicación digital*. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 50(2), 461–482.
- Jambulingam, R., & Jardine, A. K. S. (1986). *Optimal maintenance scheduling using Weibull life data*. *Naval Engineers Journal*, 98(2), 57–64.
- Liu, M., & Frangopol, D. M. (2018). *Multi-objective maintenance planning for deteriorating ship structures under time-variant uncertainty*. *Structural Safety*, 74, 95–106.
- Martínez, R. (2006). *Aplicación de simulaciones Monte Carlo para optimizar planes de mantenimiento en embarcaciones*. *Revista Ingeniería Naval*, 84(3), 22–31.
- Martínez Rabanales, S., Hernández Martínez, A., Sosa Pintle, A. M., García Sierra, M. R., & Martínez Ramírez, V. (2024). *Sistema de gestión y control de mantenimiento industrial para líneas de producción de cojinetes alto volumen*. *REVISTA IPSUMTEC*, 7(2), 258–263.
- Martins, L., Silva, F., Pimentel, C., Casais, R., & Campilho, R. (2020). *Improving Preventive Maintenance Management in an Energy Solutions Company*. *Procedia Manufacturing*, 51, 1737–1743.
- Maukar, A., Widaningsih, I., & Adiprabowo, R. (2016). *Scheduling Preventive Maintenance on Auto Rooting Machine at Toys Manufacturer Company*. *Jurnal Teknologi dan Industri*, 3(1), 34–41.

- Misson, C. V. G., Sabariz, A., Dantas, G. C., Brito, L. C., & Brito, J. N. (2023). *Estudo dos parâmetros de confiabilidade na análise da efetividade de estratégias de manutenção*. Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial. CONEMI.
- Organización Internacional de Normalización. (2014). *Gestión de activos generales, principios y terminología*. (ISO 55000).
- Organización Internacional de Normalización. (2014). *Gestión de activos generales, principios y terminología*. (ISO 55001).
- Pillado Portillo, M., Castillo Pérez, V. H., & de la Riva Rodríguez, J. (2022). *Metodología de administración para el mantenimiento preventivo como base de la confiabilidad de las máquinas*. RIDE Revista Iberoamericana Para La Investigación Y El Desarrollo Educativo, 12(24).
- Pinto, G., Silva, F. J. G., Baptista, A., Fernandes, N., Casais, R., & Carvalho, C. (2020). *TPM Implementation and Maintenance Strategic Plan – A Case Study*. Procedia Manufacturing, 51, 1744–1750.
- Praharsi, Y., Sriwana, I., & Sari, D. M. (2015). *Perancangan Penjadwalan Preventive Maintenance pada PT. Artha Prima Sukses Makmur*. Jurnal Ilmiah Teknik Industri, 14(1), 33–40.
- Sousa, M. F., de Andrade, R. M., Oliveira, D. B., & Lima, R. C. F. (2018). *Maintenance management of port equipment: A case study of port of Recife in Brazil*. Transportation Research Procedia, 33, 207–214.
- Thomas, D. S., & Weiss, B. (2021). *Maintenance Costs and Advanced Maintenance Techniques in Manufacturing Machinery: Survey and Analysis*. International Journal of Prognostics and Health Management, 12(1), 1-12.
- Trimarjoko, A., & Romadhon, A. S. K. (2024). *Markov Chain Method in Decision Implementation of Preventive Maintenance Scheduling to Reduce Equipment Downtime in PT. ADF Indonesia: Case Study*. Indonesian Journal of Industrial Engineering and Management, 5(1).

Ynzunza, C., Izar, J., Larios, M., Aguilar, F., Bocarando, J., & Acosta, Y. (2017). *Tendencias de la gestión de los activos y el mantenimiento predictivo en la industria 4.0: Potencialidades y beneficios*. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 4(11), 30–43.

ANEXOS

- Diagrama Causa – Efecto: https://miro.com/welcomeonboard/aHkzVjhQRm5TNURJRZsR05MMkN1aU81bndSN GwxblZTMXZMLzN0ZndvRHpwWk5sUVJwcVFIEtBrQ2diaHVURGFsZzIRWDJrV XpsYTE1SS95RUdDK2M3b1JwMINDeHRiRHpSZXRIVGxZbDBLZTRsS2tycys5TWc 0SXNJTkZtcXpyVmtkMG5hNDA3dVlnCnBvRVB2ZXBnPT0hdjE=?share_link_id=723 990786158
- Diagrama Medios – Fines: https://miro.com/welcomeonboard/UGViQIRhZ0F3eG5XcFRPTitPbmlyQmx0RDhlcWR kMEpCRmxUcVBINFFCTDdQMk53VW40QnV2bk5FQ2M2UjROYWF3WFg0K1drY S9xa214VjFSd0twYjg3b1JwMINDeHRiRHpSZXRIVGxZbDMxNIBBSEIrMGZsdnYy UmxvbThlOWNNakdSWkpBejJWRjJhRnhhb1UwcS9BPT0hdjE=?share_link_id=35372 2307741
- Formato de inventario de herramientas y equipos actual: [FORMATO DE INVENTARIO DE HERRAMIENTAS Y EQUIPOS.xlsx](#)
- Clasificación de herramientas y máquinas por material utilizado: [Clasificacion_Materiales_Impacto_Maquinaria.xlsx](#)
- Formato de control de herramientas y equipos: [FORMATO DE CONTROL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPOS.xlsx](#)
- Diagrama AS – IS: https://lucid.app/lucidchart/43ee5678-a1ec-4078-94ad-3b9f8eeac0d0/edit?viewport_loc=-896%2C502%2C1896%2C788%2C~pnypA2Ce&invitationId=inv_ed7598f9-7362-4ad8-8d64-618c720414a2
- Diagrama TO – BE: https://lucid.app/lucidchart/43ee5678-a1ec-4078-94ad-3b9f8eeac0d0/edit?viewport_loc=-896%2C502%2C1896%2C788%2C~pnypA2Ce&invitationId=inv_ed7598f9-7362-4ad8-8d64-618c720414a2

- Cronograma:

[https://prod.teamgantt.com/gantt/schedule/?ids=4229258&public_keys=VomANoJgxl1&zoom=d100&font_size=12&estimated_hours=0&assigned_resources=0&percent_complete=0&documents=0&comments=0&col_width=355&hide_header_tabs=0&menu_view=1&resource_filter=1&name_in_bar=0&name_next_to_bar=0&resource_names=1&resource_hours=1#user=&company=&custom=&date_filter=&hide_completed=&color_filter](https://prod.teamgantt.com/gantt/schedule/?ids=4229258&public_keys=VomANoJgxl1&zoom=d100&font_size=12&estimated_hours=0&assigned_resources=0&percent_complete=0&documents=0&comments=0&col_width=355&hide_header_tabs=0&menu_view=1&resource_filter=1&name_in_bar=0&name_next_to_bar=0&resource_names=1&resource_hours=1#user=&company=&custom=&date_filter=&hide_completed=&color_filter=)
=

- Base de datos: [Base de datos.xlsm](#)