

Estudio de la aplicación de pruebas de ultrasonido como método de mantenimiento predictivo en
tanques de almacenamiento de combustibles líquidos

Luis Carlos Valbuena Villamil

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Heller Guillermo Sánchez Acevedo

PhD en Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis padres, que son mi gran ejemplo y apoyo constante e incondicional.

A mis hermanos, Camilo, Andrés y Celeste, por su fuerza y su ejemplo.

A mi amor Jessica, por ser mi compañera de vida y celebrar conmigo cada pequeño avance.

A mis hijos Emilia y Mateo por ser mi gran inspiración y mayor motivación

A mi gran amigo Hugo Andrés, por su amistad incondicional y por estar en este largo viaje del emprender.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por ser mi alma mater y formarme como profesional.

Al profesor Heller por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de grado.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Objetivos	15
2.1. Objetivo General.....	15
2.2. Objetivos Específicos.....	15
3. Metodología	16
4. Resultados	17
4.1. Resultados Objetivo 1	17
4.1.1. Pruebas de ultrasonido	19
4.1.2. Inspección visual.....	20
4.1.3. Pruebas de partículas magnéticas.....	21
4.1.4. Pruebas de líquidos penetrantes	22
4.1.5. Pruebas hidrostáticas.....	22
4.2. Resultados Objetivo 2.....	22
4.3. Resultados Objetivo 3	31
4.4. Resultados Objetivo 4.....	36
5. Conclusiones	40
6. Recomendaciones	42
Referencias Bibliográficas	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Comparativa entre diferentes tipos de pruebas</i>	24
Tabla 2 <i>Comparativa entre pruebas hidrostáticas y pruebas de ultrasonido</i>	37

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Matriz de decisión de Pugh</i>	28
Figura 2 <i>Mapa de procesos aplicación de pruebas</i>	36

Glosario

Corrosión: proceso de deterioro de un material, usualmente metal, causado por reacciones químicas o electroquímicas con el medio ambiente, lo que afecta su integridad estructural.

Espectroscopia ultrasónica: técnica avanzada que utiliza ultrasonido para analizar la composición y estructura interna de materiales, permitiendo la detección de defectos que no son visibles a simple vista.

Integridad estructural: capacidad de una estructura o componente para soportar las cargas y presiones a las que está sometido sin presentar fallos o deformaciones que comprometan su funcionamiento.

Lucro cesante: pérdida económica resultante de la interrupción de una actividad operativa, como el tiempo en que un tanque de almacenamiento debe ser retirado de servicio durante las inspecciones o pruebas.

Mantenimiento predictivo: estrategia de mantenimiento que se basa en el monitoreo continuo del estado de los equipos para predecir posibles fallas antes de que ocurran, lo que permite programar reparaciones o ajustes preventivos.

Norma ISO/IEC 17020: estándar internacional que especifica los requisitos para la operación de organismos que realizan inspecciones, asegurando la competencia técnica y la imparcialidad en los procesos de evaluación.

PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing): método avanzado de pruebas ultrasónicas que utiliza un conjunto de sondas para crear imágenes detalladas de la estructura interna de un material, permitiendo la detección precisa de defectos.

Presión de trabajo: presión máxima a la que un tanque o sistema puede ser sometido durante su operación normal sin comprometer su seguridad o integridad estructural.

Pruebas no destructivas (PND): métodos de inspección que permiten evaluar la integridad de un material, componente o sistema sin causar daños. Son ampliamente utilizadas en el mantenimiento de estructuras y equipos industriales.

Tanques de almacenamiento de combustibles líquidos: estructuras diseñadas para almacenar combustibles en estado líquido, como gasolina o diésel. Pueden ser superficiales o subterráneos y deben ser sometidos a pruebas periódicas para garantizar su seguridad.

TOFD (Time of Flight Diffraction): técnica ultrasónica utilizada para detectar y medir defectos en soldaduras mediante la difracción de ondas sonoras. Es especialmente útil para detectar grietas en la zona de las soldaduras.

Resumen

Título: Estudio de la aplicación de pruebas de ultrasonido como método de mantenimiento predictivo en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos*

Autor: Luis Carlos Valbuena Villamil**

Palabras Clave: mantenimiento predictivo, pruebas de ultrasonido, tanques de almacenamiento de combustibles líquidos.

Descripción: Esta monografía aborda la utilización de pruebas de ultrasonido como una herramienta para el mantenimiento predictivo en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos. El objetivo principal es determinar la viabilidad técnica y financiera de la aplicación de estos métodos en tanques de almacenamiento de combustibles fabricados en acero. El estudio comienza con la recopilación de la información y describiendo la importancia de los tanques de almacenamiento de combustibles líquidos en estaciones de servicio, así como los riesgos presentes por posibles fugas o deterioro estructural. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos a través de las pruebas de ultrasonido. Se discuten también las ventajas y limitaciones de este método en comparación con otras técnicas de inspección como la aplicación de pruebas de hermeticidad. Luego, se revisan los fundamentos teóricos del ultrasonido como técnica de inspección no destructiva, equipos necesarios y metodologías de inspección. A continuación, se detalla la metodología utilizada para llevar a cabo las pruebas de ultrasonido. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos a través de las pruebas de ultrasonido. Se discuten también las ventajas y limitaciones de este método en comparación con otras técnicas de inspección como la aplicación de pruebas de hermeticidad. Finalmente, se concluye destacando la eficacia de las pruebas de ultrasonido como herramienta de mantenimiento predictivo en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos, recomendando su incorporación en los programas de mantenimiento de estas instalaciones para garantizar su integridad estructural y seguridad operativa a largo plazo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo. PhD.

Abstract

Title: Study of the application of ultrasonic testing as a predictive maintenance method in liquid fuel storage tanks.*

Author(s): Luis Carlos Valbuena Villamil **

Key Words: predictive maintenance, ultrasound testing, liquid fuels storage tanks

Description: This monograph addresses the use of ultrasonic testing as a tool for predictive maintenance in liquid fuel storage tanks. The main objective is to determine the technical and financial feasibility of the application of these methods in steel fuel storage tanks. The study begins by gathering information and describing the importance of liquid fuel storage tanks in service stations, as well as the risks present due to possible leaks or structural deterioration. Subsequently, the results obtained through ultrasonic testing are presented. The advantages and limitations of this method in comparison with other inspection techniques such as the application of hermeticity tests are also discussed. Then, the theoretical foundations of ultrasound as a non-destructive inspection technique, necessary equipment and inspection methodologies are reviewed. Next, the methodology used to carry out the ultrasonic tests is detailed. Subsequently, the results obtained from the ultrasound tests are presented. The advantages and limitations of this method in comparison with other inspection techniques such as the application of hermetic tests are also discussed. Finally, it is concluded by highlighting the effectiveness of ultrasonic testing as a predictive maintenance tool in liquid fuel storage tanks, recommending its incorporation in the maintenance programs of these facilities to ensure their structural integrity and long-term operational safety.

* Trabajo de Grado

** School of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo. PhD

Introducción

El mantenimiento predictivo en los tanques de almacenamiento de combustibles líquidos es crucial para garantizar la seguridad operativa y prevenir fallos catastróficos que podrían causar daños ambientales y financieros significativos. Actualmente, las pruebas hidrostáticas son el método predominante para evaluar la integridad de estos tanques, sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes, como la necesidad de sacar de operación los tanques, lo que genera pérdidas económicas debido al lucro cesante, y el riesgo inherente de rupturas debido a la presión aplicada durante las pruebas. Ante esta problemática, surge la necesidad de explorar alternativas más eficientes y seguras, como las pruebas de ultrasonido, que no requieren interrupciones operativas y no someten a los tanques a condiciones de estrés.

Los antecedentes que respaldan este estudio se centran en el creciente interés por mejorar la seguridad y eficiencia operativa en sectores críticos como el energético, ya que diversos estudios han demostrado que el uso de técnicas no destructivas, como el ultrasonido, permite detectar fallos en etapas tempranas, lo que reduce la probabilidad de fallos graves y optimiza el ciclo de vida de los equipos. A nivel global, la tendencia hacia el mantenimiento predictivo basado en tecnologías avanzadas ha mostrado resultados prometedores en términos de reducción de costos y mejora de la seguridad operativa, lo que motiva la exploración de su aplicabilidad en el contexto colombiano.

El propósito de este trabajo es proporcionar un análisis exhaustivo que permita determinar si las pruebas de ultrasonido representan una opción viable para reemplazar las pruebas hidrostáticas en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos. Para ello, se evaluarán aspectos técnicos y financieros, con el fin de demostrar que, aunque el costo inicial de implementación del ultrasonido puede ser mayor, los beneficios en términos de reducción de

tiempos de inactividad, menor riesgo operativo y mayor precisión en la detección de fallas justifican su adopción como método estándar de mantenimiento predictivo.

La justificación de esta investigación radica en el impacto positivo que su implementación tendría tanto en el ámbito técnico como económico. En términos financieros, la industria podría beneficiarse al reducir los costos asociados a las interrupciones operativas y evitar el riesgo de rupturas que podrían generar derrames y consecuencias ambientales. En el ámbito social, el uso de pruebas más seguras y eficientes contribuiría a mejorar las condiciones de seguridad laboral, al minimizar los riesgos para los trabajadores que realizan inspecciones en los tanques. Además, este estudio contribuirá al desarrollo de un enfoque más moderno y tecnológicamente avanzado para el mantenimiento predictivo en Colombia, alineándose con las mejores prácticas internacionales.

Este proyecto de investigación emplea un enfoque comparativo basado en el análisis técnico y financiero de ambos tipos de pruebas, con el objetivo de proporcionar una visión integral que permita tomar decisiones informadas sobre la mejora de los procedimientos de mantenimiento. De esta manera, se espera que los resultados obtenidos sirvan como base para futuras implementaciones y mejoras en el mantenimiento predictivo de tanques de almacenamiento de combustibles líquidos, optimizando los recursos y mejorando la seguridad de las instalaciones.

1. Planteamiento del problema

El sector de la comercialización de los combustibles líquidos en Colombia viene regulado desde el año 2005, como son los decretos 4299 de 2005 y el decreto 1073 de 2015 decretos que se realizan a partir de normas nacionales como las “Normas Técnica Colombiana” (NTC) y normas internacionales como las normas La “National Fire Protection Association” (NFPA) (Sector Administrativo de Minas y Energía, 2015). El decreto 4299 de 2005 establece en su artículo 1:

Objeto. Este decreto tiene por objeto establecer los requisitos, obligaciones y el régimen sancionatorio, aplicables a los agentes de la cadena de distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, excepto GLP, señalados en el artículo 61 de la Ley 812 de 2003, con el fin de resguardar a las personas, los bienes y preservar el medio ambiente. (Presidencia de la República de Colombia, 2005)

Actualmente el sector se rige bajo la resolución 40198 de junio de 2021, esta norma describe el reglamento técnico aplicado a las estaciones de servicio de combustibles líquidos, este reglamento técnico en el Artículo 5.6.2. describe las actividades de mantenimiento que se deben llevar a cabo en la estación de servicio.

Para el mantenimiento de tanques de almacenamiento de combustibles superficiales y subterráneos, la norma describe: A partir de la entrada en vigor de los presentes requisitos, se deberán realizar pruebas de verificación de la hermeticidad del sistema de almacenamiento de combustible, mínimo una vez cada 2 años. Estas pruebas las deberá realizar un organismo de inspección acreditado por ONAC bajo la norma ISO /IEC 17020 con alcance en la norma UNE-EN 13160, y/o NFPA 30 y las disposiciones relacionadas en el presente reglamento técnico. El procedimiento de la prueba debe seguir las recomendaciones del fabricante y nunca sobrepasar la

presión máxima de operación del Tanque. Para Tanques que hayan contenido Líquidos Inflamables no podrá utilizarse aire como fluido de prueba.

El informe de resultados deberá incluir, como mínimo el procedimiento, la representación gráfica del comportamiento de cada prueba, el reporte de resultados, los equipos utilizados y el personal que realiza la prueba. Hasta tanto existan en el mercado por lo menos 2 organismos de inspección acreditados por ONAC bajo la norma ISO /IEC 17020 y durante los dos (2) años siguientes a la entrada en vigor de los presentes requisitos, se aceptará un Certificado De Primera Parte, de acuerdo con la ISO/EC 17050-1 y 2 (Ministerio de Minas y Energia, 2021).

El tipo de prueba descrita en el reglamento técnico tiene como desventaja primordial, que puede pasar de prueba no destructiva a prueba destructiva, esto además de generar daños en el tanque de almacenamiento, se puede generar daño ambiental catastrófico. El lapso de cada 2 años para realizar la prueba es un tiempo muy extenso, ya que los combustibles generan corrosión en tanques fabricados en acero y esto genera un bajo espesor en las paredes del mismo lo cual genera una alta contaminación en el combustible almacenado, aumentando así los costos de mantenimiento por actividades de lavado interno de los tanques.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Determinar la viabilidad técnica y financiera de la aplicación de pruebas no destructivas de ultrasonido en tanques fabricados en acero utilizados para el almacenamiento de combustibles líquidos como método de mantenimiento predictivo.

2.2. Objetivos Específicos

Identificar, mediante revisión bibliográfica, los diferentes tipos de pruebas no destructivas aplicables a tanques de almacenamiento de combustibles líquidos para el establecimiento de posibles alternativas de métodos de mantenimiento predictivo.

Analizar, a través de una tabla comparativa, las pruebas no destructivas de ultrasonido respecto a los otros tipos de pruebas no destructivas aplicables a tanques de almacenamiento de combustibles líquidos que permita su utilización como método de mantenimiento predictivo.

Diseñar una metodología para la aplicación de pruebas de ultrasonido en tanques fabricados en acero, considerando aspectos como la tipología y topología de los tanques y el tipo de medición de ultrasonido para su integración como método de mantenimiento predictivo.

Realizar un análisis de costo-beneficio de la implementación del estudio de pruebas no destructivas de ultrasonido como método de mantenimiento predictivo en tanques fabricados en acero utilizados para el almacenamiento de combustibles líquidos.

3. Metodología

El estudio de la viabilidad de la implementación de las pruebas de ultrasonido como método de mantenimiento predictivo en tanques de almacenamiento se desarrolló en 4 fases:

Fase 1: Se identificaron los tipos de pruebas no destructivas aplicables a tanques de almacenamiento de combustibles líquidos: Se realizó una revisión bibliográfica en libros y artículos científicos relacionados con pruebas no destructivas aplicables a tanques de almacenamiento de combustibles líquidos.

Fase 2: Se hizo un análisis de pruebas no destructivas de ultrasonido respecto a otras técnicas: Se elaboró una tabla comparativa donde se incluyeron las diferentes técnicas de pruebas no destructivas identificadas en la fase 1, destacando aspectos como su aplicabilidad, precisión, costos, tiempo requerido y facilidad de implementación.

Fase 3: Se diseñó una metodología para la aplicación de pruebas de ultrasonido en tanques de almacenamiento, considerando aspectos como la tipología y topología de los tanques, el espesor del material, la presencia de recubrimientos y otros factores que puedan influir en la realización de las pruebas de ultrasonido.

Fase 4: Se realizó un análisis de costo-beneficio recopilando los datos sobre los costos asociados con la implementación de pruebas no destructivas de ultrasonido en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos, incluyendo equipos, capacitación del personal, tiempo de inspección y mantenimiento del equipo.

4. Resultados

4.1. Resultados Objetivo 1

La importancia en la inspección en tanques de almacenamiento para determinar las pérdidas de espesor producidas por la corrosión ha llevado al desarrollo de un sistema de inspección por ultrasonidos que permita el estudio del espesor de estructuras metálicas, tales como tanques de almacenamiento, tubos. (Delgado et al., 2015)

Esta tecnología, en comparación con otros métodos, facilita la evaluación de daños sin interrumpir las operaciones, lo que es un aspecto importante para plantas industriales que operan en sectores como el de los hidrocarburos (Grajales, 2014). Además, el uso de ondas guiadas y análisis de imágenes por ultrasonido ha optimizado la capacidad de detectar grietas y corrosión en una etapa temprana, lo que permite una intervención rápida. Esto no solamente previene daños estructurales, sino que también optimiza los costos y la seguridad operativa, lo que lo diferencia de las pruebas más tradicionales. (Toledo Alvarado & Espinoza Leon, 2024)

El ultrasonido es una técnica clave en las pruebas no destructivas, aplicadas especialmente en el sector de los hidrocarburos, la aplicación de esta prueba puede mejorar la evaluación de la integridad de los tanques de almacenamiento de combustibles.

Los defectos no detectados o mal evaluados pueden resultar en fugas, fallas catastróficas o accidentes graves. Mediante la investigación del ultrasonido industrial, se busca mejorar la detección y caracterización de defectos, lo que permitiría una identificación temprana de posibles problemas y la implementación de medidas de mitigación adecuadas. (Romero Lara & Brito Moncayo, 2023)

La detección y el análisis de los defectos o imperfecciones detectadas en los materiales de los tanques de almacenamiento mediante la aplicación de las pruebas de ultrasonido involucran métodos específicos que incluyen la relación de la amplitud y la forma de la onda, análisis de imágenes ultrasónicas entre otros. Las teorías y enfoques relacionados con el procesamiento de señales, la estadística y la inteligencia artificial pueden ser relevantes en este contexto. (Romero Lara & Brito Moncayo, 2023)

A diferencia de las pruebas hidrostáticas, el ultrasonido no requiere el uso de presión interna, lo que reduce los riesgos y costos asociados con la pérdida de ganancias. Mediante el uso de técnicas como el ultrasonido en fase, se pueden lograr imágenes detalladas de los defectos internos y las propiedades mecánicas de los materiales, lo que facilita la planificación del mantenimiento predictivo basada en datos precisos, reduciendo la probabilidad de accidentes graves o desgaste acelerado. (Torres, 2014)

Los defectos que se pueden detectar aplicando las pruebas de ultrasonido pueden ser poros o fisuras y pérdidas de espesor por presencia de corrosión en la superficie del tanque. Es utilizado también para conocer las propiedades básicas de los líquidos y sólidos como la composición y su estructura. (Perez Nolivos & Nuñez Medranda, 2009)

Las normas utilizadas para el diseño, construcción y mantenimiento de tanques de almacenamiento como la ASME sección V y la API 653 recomiendan el uso de las pruebas de ultrasonido para controlar la corrosión que se pueda presentar en los tanques. La ventaja de usar ultrasonido es que el tanque puede estar en servicio mientras se realizan las mediciones. (Toala, 2013)

Las pruebas no destructivas se caracterizan porque son métodos usados que se aplican sin dañar el material o la estructura del tanque, en la actualidad existen varios tipos de pruebas no destructivas, entre las cuales se destacan:

4.1.1. Pruebas de ultrasonido

Las pruebas de ultrasonido son pruebas que se utilizan para monitorear el estado de los equipos o las estructuras mediante la detección temprana de posibles fallas. Las pruebas de ultrasonido como parte del mantenimiento predictivo implican el uso de equipos especializados que emiten y reciben ondas ultrasónicas. Estas ondas sonoras de alta frecuencia son capaces de detectar pequeñas variaciones en la estructura del tanque instalados de manera superficial como subterráneo, lo que puede indicar desgaste, corrosión y fugas en los tanques (Rosales, 2023).

Al realizar pruebas de ultrasonido en los tanques, se puede identificar fallas en una etapa temprana, lo que permite programar el mantenimiento preventivo o correctivo antes de que ocurran fallos catastróficos para el medio ambiente y con altos costos. Esto ayuda a mejorar la confiabilidad de los tanques de almacenamiento, reduce el tiempo de inactividad del tanque no planificado y optimizar los costos de mantenimiento. En consecuencia, las pruebas de ultrasonido como parte del mantenimiento predictivo en tanques de almacenamiento son una buena herramienta para prevenir problemas en los tanques de almacenamiento, maximizando así su vida útil y su rendimiento operativo. Entre las más usadas se destacan:

Ultrasonido Convencional: Es la técnica básica que usa un transductor para enviar ondas sonoras dentro del material para detectar fallas como grietas, corrosión y pérdidas de espesor.

Ultrasonido Phased Array: Esta técnica usa un conjunto de transductores que emiten pulsos en diferentes ángulos, esto permite una inspección más precisa y detallada.

Ultrasonido de Ondas Guiadas: Esta técnica usa ondas sonoras que viajan a lo largo de las superficies lo que permite inspeccionar grandes áreas.

Ultrasonido en Modo B O C Scan: Esta técnica puede crear imágenes bidimensionales o tridimensionales de la estructura interna del tanque.

Ultrasonido de tiempo de vuelo por difracción: Esta técnica mide el tiempo que tardan las ondas en viajar a través del material y regresar al transductor después de encontrar la falla. La técnica de Difracción por Tiempo de Vuelo tiene una gran sensibilidad y es capaz de detectar defectos con varias orientaciones que no suelen detectarse, o que resultan difíciles de detectar, con medios convencionales. Esta técnica también está considerada como uno de los métodos más rápidos de ensayos no destructivos que hay disponibles, de entre los que ofrecen este nivel de información. (APPLUS, 2024)

Ultrasonido Automatizado o Semiautomatizado: Esta técnica emplea sistemas automatizados o semiautomatizados que recorren el tanque, realizando una inspección ultrasónica de manera sistemática.

4.1.2. Inspección visual

La inspección visual en tanques de almacenamiento de combustibles líquido es una evaluación directa de la condición física del tanque mediante observación visual. Este proceso se realiza de manera periódica y sistemática para detectar posibles signos de deterioro, corrosión, fugas u otros problemas que puedan afectar la integridad estructural del tanque o la calidad del combustible almacenado. Este método aplica para tanques instalados de manera superficial o tanques instalados en bóvedas y se realiza inspección externa del tanque, para evitar ingresar al tanque y correr riesgos. Durante la inspección visual se busca señales de daño o desgaste, como corrosión, grietas, abolladuras, manchas de corrosión, fugas de líquido y problemas con las

soldaduras. Además, se pueden revisar los accesorios y sistemas asociados al tanque, como las válvulas, las tuberías de entrada y salida. Es importante que la inspección visual se realice de manera regular y según las normas de seguridad personal y del medio ambiente. En resumen, la inspección visual en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos como método de mantenimiento predictivo es una práctica crucial para garantizar la seguridad, la fiabilidad y el cumplimiento normativo en la operación de instalaciones de almacenamiento de combustibles. La inspección visual tiene grandes limitaciones al momento de identificar fallas en etapas incipientes, y fallas que se encuentran internas al material o en lugares no visibles. Por lo tanto, es una técnica que no puede ser considerada dentro de las estrategias predictivas.

4.1.3. Pruebas de partículas magnéticas

Las pruebas de partículas magnéticas en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos son un método de inspección no destructiva utilizado para detectar posibles defectos superficiales e internos en la estructura del tanque. Este método se basa en la capacidad de las partículas magnéticas para ser atraídas hacia discontinuidades magnéticas en el material. Estas pruebas tienen detectan en una pieza las posibles discontinuidades en materiales ferromagnéticos que haya no solo en la superficie, sino también en las proximidades de ella. El método se basa en la atracción de un polvo metálico aplicado sobre la superficie hacia las discontinuidades presentes en el material bajo la acción de un campo magnético. La acumulación de este polvo metálico en torno a las discontinuidades revelará la localización de estas. (SCI Control & Inspección, 2023).

Las pruebas de partículas magnéticas son especialmente útiles para detectar defectos superficiales e internos, como grietas, inclusiones, porosidades y discontinuidades en las soldaduras, que pueden comprometer la integridad estructural del tanque y provocar fugas o fallas

graves. Este método de inspección no destructiva es rápido, eficiente y sensible, lo que lo hace ideal para la detección temprana de problemas en tanques de almacenamiento.

4.1.4. Pruebas de líquidos penetrantes

Las pruebas de líquidos penetrantes consisten en la aplicación de un líquido el cual penetra o ingresa en las discontinuidades presentadas en la superficie de los tanques como grietas, fisuras y poros, se usa para asegurar y garantizar la integridad estructural de los tanques. Este líquido tiene la capacidad de fluir y entrar en las discontinuidades abiertas a la superficie por acción capilar. Se debe dejar el líquido por un periodo de tiempo específico para permitir que penetre por completo en todas las discontinuidades. Por tanto, si existiera discontinuidades y/o defectos abiertos a la superficie el líquido penetrante será absorbido por el líquido revelador de esa forma se afirmará que contiene discontinuidades superficiales. (Rincón Camargo, 2022)

4.1.5. Pruebas hidrostáticas

Son un método de ensayo no destructivo utilizado para verificar la integridad estructural de los tanques y la ausencia de fugas. Consisten en la inyección de aire para los tanques nuevos o nitrógeno para tanques en uso, hasta lograr una presión entre 3 y 5 psi, esta presión se debe mantener por el lapso de una hora. Estas pruebas se hacen con el objetivo de asegurar que el tanque puede soportar las presiones de trabajo. Estas pruebas tienen en cuenta la dilatación térmica del líquido almacenado, pérdidas por evaporación y efectos de cualquier otra variable, incluyendo el nivel de las aguas subterráneas. (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

4.2. Resultados Objetivo 2

A continuación, se presenta un análisis comparativo de las principales pruebas no destructivas aplicables a los tanques de almacenamiento de combustibles líquidos, con el objetivo de evaluar su idoneidad como métodos de mantenimiento predictivo, puesto que se basa en

diversas características clave, como la aplicabilidad, precisión, costos, tiempo de ejecución y facilidad de implementación de cada técnica. Las pruebas seleccionadas para este estudio incluyen ultrasonido, inspección visual, partículas magnéticas, líquidos penetrantes e hidrostáticas y la finalidad de este apartado es proporcionar una visión detallada que permita identificar las fortalezas y limitaciones de cada técnica, de manera que se pueda determinar cuál es la más adecuada para garantizar la integridad estructural de los tanques y optimizar su mantenimiento a lo largo del tiempo.

El análisis de las pruebas no destructivas aplicadas a los tanques de almacenamiento de combustibles líquidos revela diferencias importantes en términos de aplicabilidad, precisión, costos, tiempo y facilidad de implementación entre las diferentes pruebas, ya que cada una de estas técnicas presenta fortalezas y debilidades específicas, lo que exige una evaluación exhaustiva para determinar cuál es la más adecuada para el mantenimiento predictivo en estos tanques, por tal razón se realiza la aplicación de una matriz de Pugh para determinar la mejor opción

Tabla 1*Comparativa entre diferentes tipos de pruebas*

Característica	Pruebas de Ultrasonido	Inspección Visual	Partículas Magnéticas	Líquidos penetrantes	Hidrostáticas
Aplicabilidad	<ul style="list-style-type: none"> * Medición de espesor de pared *Detección de corrosión *Evaluación en soldaduras *Detección de grietas internas *Evaluación de la integridad del tanque 	<ul style="list-style-type: none"> * Evaluación de la integridad del tanque * Evaluación de soldaduras * Fugas de combustibles * Detección de grietas externas 	<ul style="list-style-type: none"> * Evaluación de la integridad superficial del tanque *Evaluación de soldaduras *Inspección de los soportes de los tanques superficiales. 	<ul style="list-style-type: none"> *Detección de grietas externas *Detección de corrosión superficial *Inspección de los soportes de los tanques superficiales 	<ul style="list-style-type: none"> *Evaluación de la integridad del tanque *Fugas de combustibles *Verificación de reparaciones en tanques
Precisión	<ul style="list-style-type: none"> * La precisión varia depende al método aplicado, material y estado del tanque y calibración del equipo. * Detección de grietas de +/- 0,2 a 2 mm * Medición de espesor y corrosión +/- 0,05 a 0,2 mm 	<ul style="list-style-type: none"> * Precisión menor a las pruebas tecnológicas * Depende la iluminación y las habilidades del inspector. * Solo puede identificar corrosión superficial * No se puede medir con precisión la profundidad de la corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> * Tamaño de defectos superficiales 0,1 mm de ancho y hasta 0,5 mm de profundidad. *La precisión depende de adecuación de la superficie y de la calidad de las partículas. 	<ul style="list-style-type: none"> * Discontinuidades superficiales de 0,001 mm de ancho y 0,5 mm de longitud * Solo puede detectar discontinuidades superficiales 	<ul style="list-style-type: none"> * Precisión depende de los equipos de medida usados Detecta pequeñas fugas mediante la caída de la presión 0,1 Gal/hora.

Característica	Pruebas de Ultrasonido	Inspección Visual	Partículas Magnéticas	Líquidos penetrantes	Hidrostáticas
		* Grietas mayores a 0,5 mm de ancho			
Costos	\$ 1.000.000-\$5.000.000 (COP) por tanque, depende del tamaño del tanque.	\$ 1.000.000-\$4.000.000 (COP) por tanque, depende del tamaño del tanque y necesidades.	\$ 1.000.000-\$3.500.000 (COP) por tanque, depende del tamaño del tanque, de la preparación de la superficie y del tipo de partículas usadas.	\$ 300.000-\$1.000.000 (COP) por tanque, depende del tamaño del tanque, certificación del personal.	\$ 1.000.000-\$2.000.000 (COP) por tanque, depende del tamaño y cantidad de combustible almacenado.
Tiempo	2 - 8 horas entre preparación de los equipos, ejecución y entrega de resultados.	2 - 4 horas para inspección externa, depende del tamaño del tanque. 1-2 días para inspección interna, depende del tamaño del tanque.	4 - 12 horas entre preparación de los equipos, ejecución y entrega de resultados, depende del tamaño del tanque y del método a usar.	1 - 6 horas entre preparación de la superficie, aplicación del líquido penetrante y revelación, inspección visual y entrega de resultados.	4 - 6 horas entre preparación de los equipos, ejecución y entrega de resultados, depende del tamaño del tanque.

Característica	Pruebas de Ultrasonido	Inspección Visual	Partículas Magnéticas	Líquidos penetrantes	Hidrostáticas
Facilidad de implementar	<p>* Accesibilidad: La facilidad de aplicación de la prueba depende de la accesibilidad al tanque.</p> <p>* Geometría del tanque: Los tanques de almacenamiento con geometría irregular, pueden requerir equipos más avanzados.</p> <p>* Experiencia: La identificación de los defectos y la buena interpretación de los datos facilitan la aplicación de la prueba.</p>	<p>* Acceso al tanque: Fácil acceso al tanque facilita la aplicación de la prueba.</p> <p>* Iluminación: Una buena iluminación facilita la detección de defectos.</p>	<p>* Limpieza: Una buena limpieza de la superficie a inspeccionar, facilita la aplicación de la prueba.</p> <p>* Usar equipos adecuados facilita la aplicación de las pruebas en superficies curvas y planas.</p> <p>* Iluminación: Una buena iluminación facilita la detección de defectos.</p>	<p>* La aplicación del líquido, el tiempo de penetración, el lavado, la aplicación del revelador y la inspección visual son procesos directos que no requieren equipamiento sofisticado.</p> <p>* La prueba se puede aplicar en superficies planas y curvas.</p>	<p>* Equipos sofisticados como reguladores y manómetros facilitan la aplicación de la prueba.</p> <p>* Aplicación en casi todo tipo de tanque.</p>
Desventajas	<p>* Si no se tiene acceso directo a las superficies a inspeccionar, se puede limitar en tanques muy grandes o de difícil acceso.</p> <p>* Los equipos usados requieren de calibraciones regulares y muy precisas.</p> <p>* En ambientes muy ruidosos, el ruido de fondo puede interferir</p>	<p>* No proporciona resultados cuantitativos.</p> <p>* Solo detecta defectos superficiales.</p> <p>* La precisión de las pruebas se pueden ver afectados por las condiciones ambientales.</p> <p>* Parada de operación del tanque de almacenamiento.</p>	<p>* Solo se puede aplicar a tanques hechos de materiales ferrosos.</p> <p>* No puede detectar defectos profundos.</p> <p>* Se requiere acceso directo a la superficie a inspeccionar.</p> <p>* Irregularidades en la superficie que no tienen que ver con</p>	<p>* No puede detectar defectos profundos.</p> <p>* Proceso largo desde la limpieza preliminar, la aplicación de los líquidos y los reveladores hasta la inspección.</p> <p>* Sensibilidad a la temperatura y la humedad.</p>	<p>* Si no se tiene el equipo adecuado, la prueba se puede generar graves daños a la integridad del tanque.</p> <p>* Requiere de gran cantidad de fluido para elevar la presión.</p> <p>* Tiempo elevado de parada de operación</p>

Característica	Pruebas de Ultrasonido	Inspección Visual	Partículas Magnéticas	Líquidos penetrantes	Hidrostáticas
	<p>con la medición y reduce la precisión de la detección.</p> <p>* Para los equipos se requiere una inversión inicial elevada.</p> <p>* Los resultados pueden ser subjetivos si no se tiene gran habilidad del personal en interpretar los datos.</p>	<p>* Riesgo de seguridad para el personal, ya que es necesario acceder a los tanques.</p>	<p>defectos, puede generar resultados falsos.</p> <p>* Los líquidos magnéticos pueden llegar a ser peligrosos si no se manejan de manera adecuada.</p> <p>* Para los equipos se requiere una inversión inicial elevada.</p>	<p>* Los productos usados como penetrantes y reveladores deben ser manejados con cuidado.</p> <p>* No es efectivo en materiales porosos.</p> <p>* Muchos factores como la presencia de contaminantes o la mala limpieza pueden dar resultados falsos.</p>	<p>del tanque de almacenamiento.</p> <p>* Cuando se usa agua para elevar la presión, puede generar corrosión.</p>

Nota: Tabla de autoría propia.

Figura 1

Matriz de decisión de Pugh

	REFERENCIA	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	OPCIÓN 5
OPCIONES	APLICACIÓN DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS A TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES	ULTRASONIDO	INSPECCIÓN VISUAL	PARTICULAS MAGNETICAS	LIQUIDOS PENETRANTES	HIDROSTATICAS
CRITERIOS	REFERENCIA	Opción 1 PUNTUACIONES	Opción 2 PUNTUACIONES	Opción 3 PUNTUACIONES	Opción 4 PUNTUACIONES	Opción 5 PUNTUACIONES
APLICABILIDAD	0	2	1	1	2	2
PRECISIÓN	0	2	-1	0	0	1
COSTOS	0	0	1	0	2	1
TIEMPO	0	1	2	-1	-1	0
FACILIDAD DE IMPLEMENTAR	0	1	1	1	2	2
DESVENTAJAS	0	1	-1	-1	-1	-1
	PUNTUACIONES TOTALES	7	3	0	4	5

Nota: Ilustración de autoría propia.

La matriz de Pugh se empleó para llevar a cabo un análisis sistemático de diversas pruebas no destructivas aplicadas a tanques. Este enfoque, fue respaldado por la asesoría de ingenieros expertos en el ámbito de las pruebas no destructivas, garantizando la validez y pertinencia de los criterios evaluados. La escala utilizada para el análisis abarcó un rango de puntuaciones que iban desde -2 hasta 2, con 0 establecido como referencia. Los valores negativos indicaban un rendimiento inferior en comparación con la opción de referencia, mientras que los positivos reflejaban mejoras o ventajas significativas. Esta metodología facilitó la identificación de la alternativa más efectiva a aplicar.

En términos de aplicabilidad, las pruebas de ultrasonido destacan por su capacidad para detectar tanto corrosión como grietas internas y evaluar la integridad de las soldaduras, lo que permite que esta versatilidad sea una ventaja clave en comparación con otras pruebas que se limitan principalmente a la detección de defectos superficiales. Por ejemplo, la inspección visual solo puede detectar deterioro externo visible, lo que la hace adecuada para la evaluación de la superficie, pero insuficiente para la identificación de problemas internos. Las pruebas de partículas magnéticas y líquidos penetrantes, aunque útiles para detectar grietas superficiales, no ofrecen la misma profundidad de análisis que el ultrasonido, lo que limita su aplicabilidad cuando se trata de tanques donde la corrosión interna es una preocupación.

En cuanto a la precisión, las pruebas de ultrasonido sobresalen nuevamente, especialmente cuando se trata de medir el espesor del material y detectar defectos internos con una alta precisión, que puede llegar a ± 0.02 mm. En contraste, la inspección visual depende en gran medida de la habilidad del inspector y las condiciones de iluminación, lo que reduce su fiabilidad para la identificación de defectos más pequeños o en zonas poco accesibles. Por su parte, las pruebas de partículas magnéticas y líquidos penetrantes ofrecen una buena precisión para defectos

superficiales, pero no pueden competir con la capacidad del ultrasonido para evaluar el estado interno del tanque. En términos de las pruebas hidrostáticas, aunque pueden detectar fugas, su precisión es más baja en comparación con las otras técnicas, ya que dependen de la observación de variaciones en la presión más que de una evaluación detallada de los defectos.

El costo es un factor que varía significativamente entre las diferentes pruebas. Las pruebas de ultrasonido, siendo una de las más avanzadas y tecnológicamente sofisticadas, son también las más costosas, sin embargo, este costo se justifica por los beneficios que ofrece en términos de precisión y detección temprana de fallos, lo que puede reducir el tiempo de inactividad del tanque y prevenir reparaciones más costosas a largo plazo. Por otro lado, las pruebas de líquidos penetrantes y la inspección visual son considerablemente más económicas, pero su alcance es limitado. Por su parte, las pruebas de partículas magnéticas, si bien tienen un costo intermedio, requieren una mayor preparación y personal especializado, lo que también puede elevar los costos operativos. Por último, las pruebas hidrostáticas, aunque relativamente económicas, pueden generar costos adicionales debido al tiempo de parada de operación que implican.

En cuanto al tiempo de implementación, las pruebas de ultrasonido requieren una preparación significativa de los equipos y pueden tardar varias horas, dependiendo del tamaño y complejidad del tanque. La inspección visual, por su parte, es mucho más rápida y sencilla, pero su limitación para identificar defectos internos la hace menos confiable para un análisis predictivo integral. Las pruebas de partículas magnéticas y líquidos penetrantes, aunque requieren un tiempo moderado de preparación, son procesos más largos que la inspección visual, pero ofrecen más detalle en la detección de defectos superficiales. Por su parte, las pruebas hidrostáticas también requieren un tiempo considerable debido a la necesidad de mantener la presión durante un período extendido, lo que puede afectar negativamente la eficiencia operativa del tanque.

Por último, en términos de facilidad de implementación, las pruebas de ultrasonido requieren acceso adecuado a las superficies del tanque y operadores altamente capacitados para interpretar los resultados y esta complejidad contrasta con la simplicidad de la inspección visual, que solo requiere una buena iluminación y acceso externo al tanque. Sin embargo, la facilidad de uso de la inspección visual también se traduce en una menor capacidad para detectar problemas graves. Las pruebas de partículas magnéticas y líquidos penetrantes requieren una preparación superficial cuidadosa, y su implementación en tanques con geometrías complejas puede ser más difícil. Y las pruebas hidrostáticas, aunque relativamente fáciles de aplicar, requieren equipos especializados y pueden generar riesgos adicionales si no se manejan adecuadamente los fluidos de prueba.

4.3. Resultados Objetivo 3

En esta fase se definieron los procedimientos específicos para la aplicación de las pruebas de ultrasonido como la preparación de la superficie, la calibración del equipo de ultrasonido, la selección de áreas de inspección y la interpretación de los resultados obtenidos. Se combinaron elementos cuantitativos y cualitativos. El enfoque cuantitativo se utiliza para recopilar y analizar datos numéricos y medibles, como la precisión de los resultados de las pruebas, la detección de defectos, las mediciones de integridad mecánica. El enfoque cualitativo es una manera complementaria para respaldar las conclusiones y las interpretaciones obtenidas a partir de los datos cualitativos (Romero Lara & Brito Moncayo, 2023).

La implementación de pruebas de ultrasonido en tanques de almacenamiento de combustible líquidos como método de mantenimiento predictivo asegura la integridad del tanque y previene grandes fallos.

1. Planificación y preparación:

- Priorización e identificación del tanque: Priorizar los tanques a inspeccionar teniendo en cuenta el tiempo de trabajo del tanque, el combustible almacenado y la criticidad para la operación de la EDS.

- Revisión de las normas aplicadas: Asegurar que el proceso de aplicación de las pruebas cumpla con las normas aplicables y regulaciones nacionales.

- Selección del equipo: Asegurar el equipo es el adecuado para la aplicación de las pruebas, que tenga capacidad de detectar corrosión y pérdida de espesor como de la superficie y del revestimiento en caso de que el tanque lo tenga, así como la capacitación adecuada del personal encargado de la aplicación de las pruebas y la interpretación de los resultados. Para obtener resultados confiables, el desarrollo de este método requiere determinar las características tanto del tanque como del sistema de medición utilizado; Los componentes como la base y los sensores deben seleccionarse en función de la forma y el tamaño de cada tanque, ya que tienen un impacto directo en la precisión de los resultados. Esto garantiza que las pruebas se adapten a las características de cada tanque, asegurando que las posibles fallas se detecten lo antes posible.

2. Inspección previa y limpieza:

- Realizar una inspección visual previa a la aplicación de las pruebas para así identificar fallos evidentes o áreas críticas para la aplicación de la prueba.

- Limpieza del tanque: Asegurar que las superficies se encuentren limpias o libres de residuos que puedan alterar la prueba.

3. Aplicación de la prueba:

La fase de prueba se centró en implementar técnicas de ultrasonido seleccionadas utilizando un enfoque estructurado para cubrir completamente el tanque. En esta etapa se deben

utilizar técnicas como PAUT y TOFD para obtener información detallada sobre la estructura interna y posibles defectos de soldadura. (Nieto, 2018) Al dividir el tanque en múltiples secciones y brindar una cobertura integral, esta etapa garantiza un examen profundo y preciso de toda la superficie del tanque.

- Métodos: Ultrasonido por pulsos para medir el espesor de las paredes del tanque, PAUT para obtener una imagen detallada y detectar discontinuidades en las paredes del tanque, TOFD para detectar grietas y defectos en soldaduras.
- Cobertura del tanque: Dividir el tanque en secciones y realizar escaneo a cada una para asegurar una buena cobertura del tanque, incluyendo el fondo, las paredes y el techo del tanque.
- Registro de datos: Asegurar el registro de todos los datos obtenidos durante la aplicación de la prueba, registrarlos en formatos estandarizados, asegurando el fácil acceso para análisis. El registro de los datos recogidos es un paso importante en la metodología ya que permite organizar de forma clara y sencilla la información obtenida. Para ello, se utilizan formatos estandarizados para facilitar la interpretación de los resultados y garantizar una documentación precisa y completa; Además, el uso de software de análisis de datos especializado facilita la identificación precisa de fallas y la generación de informes detallados para respaldar la toma de decisiones durante el mantenimiento preventivo.

4. Análisis de datos y evaluación:

Para estructurar un análisis eficaz, la metodología debe determinar qué tipo de datos se recopilarán y qué métodos de análisis se utilizarán, por ejemplo, interpretación de variaciones de espesor, detección de grietas y medición de corrosión, permitiendo clasificar los defectos según su naturaleza, escala y ubicación. Esto establece un proceso analítico detallado que va más allá de la

simple revisión de los datos y permite una interpretación precisa de los resultados para tomar decisiones informadas.

- Interpretación de resultados: Analizar los datos obtenidos para identificar fallas en tanques tales como corrosión, pérdidas de espesor o grietas, usar un software especializado para una mejor visualización de los datos.

- Evaluación de riesgos: Evaluar la gravedad de los daños encontrados en caso tal que se presenten y evaluar los riesgos asociados a la integridad y operación del tanque.

5. Acciones correctivas y mantenimiento:

Para vincular este enfoque a una estrategia de mantenimiento preventivo, es importante desarrollar un sistema de registro estandarizado. El sistema incluye no sólo datos de inspección sino también gráficos de tendencias que facilitan el análisis continuo y la planificación de inspecciones futuras. Este método se integra con el sistema de mantenimiento de su empresa, permitiéndole crear pronósticos y ajustar estrategias basadas en información específica y actual.

- Reparaciones: Priorizar y planificar las acciones correctivas en base en la evaluación de riesgos, seguir las acciones correctivas conforme a las normas aplicables vigentes.

- Reinspección: Realizar una nueva inspección después de realizar las acciones correctivas, para asegurar que los defectos fueron corregidos.

6. Documentación:

Cuando se trata de documentación, el enfoque debe ir más allá de simples grabaciones de fotografías o videos y organizar la información en formatos estándar y específicos, incluido el registro de los valores clave de cada prueba; La documentación así creada no sólo permite mantener registros adecuados, sino que también crea una base de datos confiable que respalda futuras auditorías y seguridad operativa.

- **Elaboración de informes:** Documentar todas las pruebas realizadas, análisis de resultados y acciones correctivas en informes detallados, incluir fotografías, videos, gráficos y toda evidencia que soporte todo lo evidenciado.

- **Actualización de los registros de mantenimiento:** Actualizar los registros de mantenimiento de los tanques donde se evidencien las pruebas realizadas con sus resultados y acciones correctivas.

7. Revisión y mejoras:

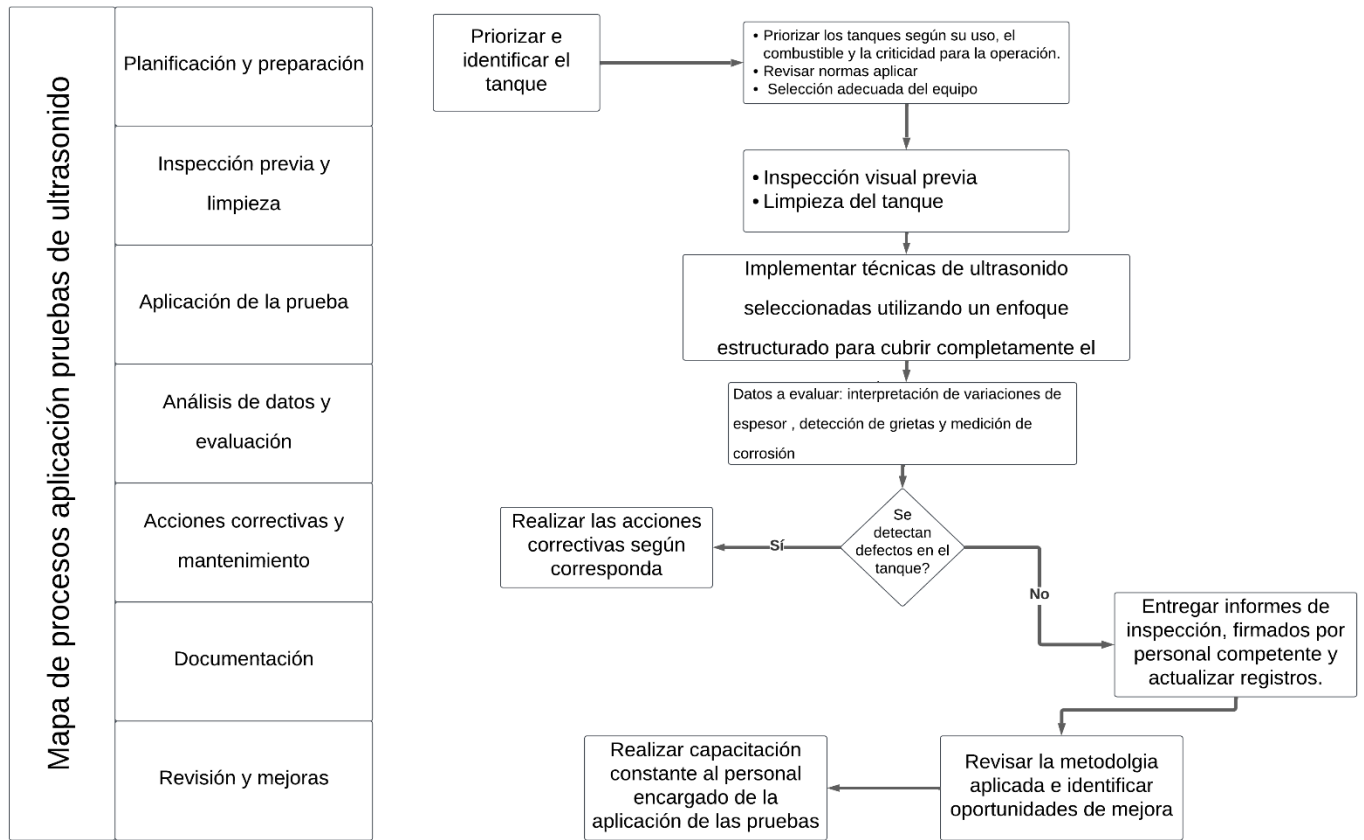
- **Revisar constantemente la metodología de la aplicación de las pruebas y los resultados obtenidos para identificar oportunidades de mejora, adaptar la metodología según los avances de la tecnología y cambio en las normas aplicadas.**

- **Capacitación:** Realizar capacitación continua al personal encargado de la aplicación de las pruebas y análisis de los datos obtenidos y así asegurar un nivel alto de competitividad técnica. La capacitación del personal es un paso importante antes de realizar un examen ecográfico porque asegura que la técnica se realice correctamente; Para lograrlo, el recurso humano involucrado debe tener conocimientos especializados en técnicas como PAUT y TOFD, así como el uso de software de análisis de datos. Estas capacidades permiten a los operadores realizar inspecciones con precisión, asegurando un nivel óptimo de confianza en los resultados.

Esta metodología asegura un enfoque estructurado para la aplicación de pruebas de ultrasonido en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos, contribuyendo a la seguridad operativa y a la longevidad de las instalaciones.

Figura 2

Mapa de procesos aplicación de pruebas



Nota: Ilustración de autoría propia.

4.4. Resultados Objetivo 4

Dando seguimiento al mapa de procesos de la ilustración 2, se presenta una comparación detallada entre las pruebas hidrostáticas, que actualmente se utilizan para evaluar la integridad de los tanques de almacenamiento de combustibles líquidos, y las pruebas de ultrasonido. El objetivo de esta fase es analizar la viabilidad de reemplazar las pruebas hidrostáticas por las de ultrasonido, considerando factores como costos, precisión, aplicabilidad, tiempo de ejecución y riesgos asociados. A través de este análisis comparativo, se busca determinar si las pruebas de ultrasonido

ofrecen ventajas significativas que justifiquen su implementación como método de mantenimiento predictivo en lugar de las pruebas hidrostáticas.

Las pruebas hidrostáticas, aunque se utilizan ampliamente, tienen limitaciones importantes que pueden afectar tanto al rendimiento como al costo en la industria del almacenamiento de combustible; Este método requiere la interrupción del suministro de presión al tanque, lo que resulta en pérdida de ganancias y aumento de costos asociados con cada prueba. Sin embargo, la alternativa ultrasónica permite realizar pruebas sin apagar el tanque, lo que genera menos pérdidas económicas y una mayor flexibilidad operativa para las empresas.

El ultrasonido, por otro lado, ofrece el beneficio adicional de precisión y seguridad porque puede detectar defectos internos sin someter el tanque a presión adicional. Al analizar la estructura interna del tanque mediante ondas ultrasónicas, se pueden detectar defectos como grietas o corrosión antes de que se conviertan en una amenaza grave; Esto reduce significativamente la posibilidad de accidentes operativos.

Tabla 2

Comparativa entre pruebas hidrostáticas y pruebas de ultrasonido

	Cúcuta	Arauca	Bucaramanga	Barrancabermeja	Aguachica
Número de Tanques	4	8	6	3	5
Valor prueba hidrostática por tanque	\$ 1.300.000	\$1.300.000	\$1.300.000	\$1.300.000	\$1.300.000
Valor total pruebas hidrostáticas	\$5.200.000	\$10.400.000	\$7.800.000	\$3.900.000	\$6.500.000
Valor total del lucro cesante	\$2.449.131	\$6.455.491	\$2.580.467	\$911.554	\$9.570.155
Costo total de prueba hidrostática	\$7.649.131	\$16.855.491	\$10.380.467	\$4.811.554	\$16.070.155

Valor prueba ultrasonido por tanque	\$1.500.000	\$1.500.000	\$1.500.000	\$1.500.000	\$1.500.000
Costo total de prueba ultrasonido	\$6.000.000	\$12.000.000	\$9.000.000	\$4.500.000	\$7.500.000
Diferencia entre prueba hidrostática y prueba ultrasonido	\$1.649.131	\$4.855.491	\$1.380.467	\$311.554	\$8.570.155

Nota: Tabla de autoría propia.

El análisis comparativo entre las pruebas hidrostáticas y las pruebas de ultrasonido en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos revela diferencias importantes en términos financieros y operativos que deben considerarse al momento de seleccionar el método de mantenimiento predictivo.

En primer lugar, las pruebas hidrostáticas tienen un costo estimado por tanque de \$1,300,000, mientras que las pruebas de ultrasonido cuestan \$1,500,000 por tanque. A primera vista, parece que las pruebas hidrostáticas son una opción más económica, pero este análisis debe incluir el impacto del lucro cesante causado por la parada operativa necesaria para realizar la prueba hidrostática. En el caso de Cúcuta, por ejemplo, el costo total de la prueba hidrostática, que incluye el lucro cesante, asciende a \$7,649,131, mientras que el costo total de la prueba de ultrasonido es de \$6,000,000. Esto significa una diferencia de \$1,649,131 a favor de las pruebas de ultrasonido. En Arauca, esta diferencia se amplía a \$4,855,491, destacando aún más las ventajas financieras de las pruebas de ultrasonido.

Este patrón se repite en las otras ciudades evaluadas: en Bucaramanga, la diferencia es de \$1,380,467; en Barrancabermeja, de \$311,554; y en Aguachica, es particularmente significativa,

alcanzando los \$8,570,155. Estos datos demuestran que, aunque el costo directo por tanque de las pruebas de ultrasonido es mayor, los costos indirectos asociados al lucro cesante y la parada operativa en las pruebas hidrostáticas hacen que las pruebas de ultrasonido sean más rentables a largo plazo.

Además del aspecto financiero, es crucial considerar los riesgos operativos asociados a las pruebas hidrostáticas. Al requerir la aplicación de presión sobre los tanques, existe un riesgo inherente de ruptura, especialmente en tanques que ya presentan signos de debilitamiento estructural o corrosión interna. La ruptura de un tanque no solo genera costos adicionales de reparación o reemplazo, sino que también puede derivar en derrames peligrosos, afectando el medio ambiente y generando sanciones regulatorias. Por el contrario, las pruebas de ultrasonido son completamente no invasivas y no someten al tanque a ningún tipo de estrés físico, lo que elimina el riesgo de daños durante la inspección.

5. Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada permitió identificar cinco técnicas principales de pruebas no destructivas aplicables a los tanques de almacenamiento de combustibles líquidos: pruebas de ultrasonido, inspección visual, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y pruebas hidrostáticas. Cada una de estas técnicas presenta ventajas y limitaciones según sus características de aplicabilidad, precisión, costo y tiempo de ejecución, sin embargo, las pruebas de ultrasonido sobresalen como una opción altamente precisa para detectar defectos internos, mientras que otras técnicas, como la inspección visual, se limitan a la detección de problemas superficiales.

Además de identificar métodos de prueba no destructivos, este análisis también confirma que el ultrasonido es superior a métodos como la prueba hidrostática tanto en precisión como en seguridad. Esto da como resultado un proceso de inspección menos invasivo y reduce el riesgo de daños estructurales a los tanques que ya muestran signos de desgaste o corrosión. La eliminación de la presión interna innecesaria durante la pesca de arrastre protege la integridad del tanque, lo cual es especialmente importante en instalaciones críticas.

El análisis comparativo demostró que las pruebas de ultrasonido ofrecen la mejor combinación entre precisión, aplicabilidad y seguridad para el mantenimiento predictivo de tanques de almacenamiento de combustibles líquidos. A pesar de su costo inicial más elevado, los beneficios en términos de detección temprana de defectos internos y la no interrupción de las operaciones justifican su adopción. Las otras pruebas, como las hidrostáticas y de líquidos penetrantes, son útiles en situaciones específicas, pero no brindan el mismo nivel de detalle ni minimizan los riesgos operacionales tanto como las pruebas de ultrasonido.

Desde una perspectiva coste-beneficio, los ultrasonidos no sólo ahorran dinero, sino que también contribuyen a mejorar la durabilidad de los sistemas de mantenimiento. Al reducir la frecuencia del tiempo de inactividad y optimizar los recursos necesarios para las inspecciones, las empresas pueden asignar estos ahorros a otras áreas críticas de operaciones. Esta rentabilidad, combinada con la mayor seguridad de esta técnica, respalda la recomendación de incluir la ecografía como estándar en los programas de mantenimiento preventivo.

La metodología diseñada para la aplicación de pruebas de ultrasonido se enfoca en garantizar una cobertura completa del tanque, asegurando la detección de posibles fallas estructurales en las paredes y las soldaduras. Este proceso incluye la división del tanque en secciones para una mejor gestión de la inspección, la calibración de los equipos y la limpieza adecuada de las superficies. Al combinar enfoques cuantitativos y cualitativos, la metodología propuesta no solo proporciona datos precisos y medibles, sino que también permite una interpretación eficaz de los resultados, lo que facilita la planificación de acciones correctivas.

El análisis de costo-beneficio mostró que, aunque las pruebas de ultrasonido tienen un costo unitario ligeramente superior al de las pruebas hidrostáticas, la eliminación de los costos asociados al lucro cesante y el riesgo de daños por presión hacen que las pruebas de ultrasonido sean más rentables a largo plazo. En particular, el ahorro generado por la menor interrupción operativa y la mayor seguridad ofrecida por las pruebas de ultrasonido sugiere que su implementación como método de mantenimiento predictivo podría reducir significativamente los costos totales de mantenimiento y reparación de los tanques, además de disminuir los riesgos ambientales y de seguridad.

6. Recomendaciones

Se recomienda a las empresas encargadas de la operación de tanques de almacenamiento de combustibles líquidos considerar la implementación de las pruebas de ultrasonido como parte de su estrategia de mantenimiento predictivo. Este método no solo ofrece una alta precisión en la detección de defectos internos, sino que también reduce los riesgos asociados a la operación de los tanques, como rupturas o fallos catastróficos, al no requerir la aplicación de presión interna.

Dado que las pruebas de ultrasonido requieren de personal altamente capacitado para operar los equipos y analizar los resultados, se recomienda invertir en programas de formación continua para los operarios. Esto garantizará una correcta aplicación de la tecnología y una interpretación adecuada de los datos, lo que es esencial para tomar decisiones informadas sobre el estado de los tanques y las acciones correctivas a seguir.

Es importante que las empresas que adopten el ultrasonido como método de mantenimiento predictivo implementen un sistema de monitoreo constante de los equipos y las pruebas realizadas. Además, se recomienda actualizar periódicamente los equipos de ultrasonido para aprovechar los avances tecnológicos, lo que puede mejorar la precisión y eficiencia de las inspecciones.

Se sugiere que las empresas revisen de manera periódica el plan de mantenimiento de sus tanques, incluyendo los resultados de las pruebas de ultrasonido, para evaluar la efectividad de la estrategia y ajustarla según sea necesario. Esto incluye la integración de nuevas tecnologías o métodos complementarios que puedan surgir en el futuro.

Se recomienda realizar evaluaciones regulares de los costos operativos asociados a la implementación de las pruebas de ultrasonido en comparación con otros métodos tradicionales, como las pruebas hidrostáticas. Esta evaluación debe incluir no solo los costos directos de las

pruebas, sino también los ahorros generados por la reducción del lucro cesante y la mejora en la seguridad operativa de los tanques.

Para asegurar la correcta aplicación de las pruebas de ultrasonido y maximizar su efectividad, se recomienda que las empresas adopten normativas y estándares internacionales vigentes para el mantenimiento predictivo de tanques de almacenamiento de combustibles líquidos. Esto contribuirá a garantizar la seguridad y confiabilidad de las operaciones, alineándose con las mejores prácticas a nivel global.

Finalmente, se sugiere que las empresas dediquen recursos a la investigación y el desarrollo de nuevas técnicas de mantenimiento predictivo, especialmente en el campo de las pruebas no destructivas. El objetivo es mejorar continuamente la seguridad y eficiencia en el manejo de tanques de almacenamiento, explorando nuevas tecnologías o métodos complementarios que puedan surgir en el futuro. (Toala, 2013)

Referencias Bibliográficas

- APPLUS. (2024). *APPLUS*. Obtenido de <https://www.applus.com/global/es/what-we-do/sub-service-sheet/inspecci%C3%B3n-por-tiempo-de-vuelo-de-ondas-difractadas>
- Delgado, R., Alvarez, A., Gauna, I., Thorpe, N., & Acebes, M. (2015). *Sistema para la inspección automática por ultrasonidos en tanques de almacenamiento*. Obtenido de https://www.ndt.net/events/PANNDT2015/app/content/Paper/54_DelgadodeMolina.pdf
- Grajales, A. J. (2014). *Diseño de escaner de ultrasonido industrial para inspección de tanques de almacenamiento*. Secretaría de Educación Pública. Obtenido de <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/210>
- Ministerio de Minas y Energía. (24 de Junio de 2021). *Resolución 40198*. Obtenido de <https://normativame.minenergia.gov.co/normatividad/6345/norma/>
- Nieto, V. (2018). *Técnicas avanzadas de inspección TOFD y PAUT*. Vepica. Obtenido de <https://www.vepica.com/es/blog/tecnicas-avanzadas-de-inspeccion-tofd-y-paut>
- Perez Nolivos, C., & Nuñez Medranda, F. (2009). *Elaboración De Procedimientos De Inspección Con Ultrasonido En El Material De Instalaciones De Recepción Y Bombeo De Petróleo*.
- Presidencia de la República de Colombia. (2005). *Decreto 4299 de 2005*. Bogotá, Colombia: Gobierno de Colombia. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18314>
- Rincón Camargo, L. (2022). *Implementación de plan de integridad en tanques y recipientes a presión de la Estación La Esperanza, Pecol Energy*. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/7f0f1847-7eb9-4459-a69b-40c80e24665c/content>

- Romero Lara, D. F., & Brito Moncayo, G. D. (2023). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*.
- Romero Lara, D. F., & Brito Moncayo, G. D. (2023). *Ultrasonido Industrial Aplicado en Ensayos no Destructivos para la Evaluación de Integridad Mecánica de Líneas y/o Recipientes a Precisión en la Industria Petrolera Orientado hacia la Ciber Resiliencia Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 1298-1318.
- Rosales, J. (2023). *¿Qué es el Análisis de Ultrasonido?* Fracttal Tech S.L. Obtenido de <https://www.fracttal.com/es/mantenipedia/que-es-el-analisis-de-ultrasonido>
- SCI Control & Inspección. (2023). *Ensayos por partículas magnéticas*. Obtenido de <https://scisa.es/ensayos-no-destructivos-y-laboratorio-metalurgico/ensayo-no-destructivos/ensayos-por-particulas-magneticas/>
- Sector Administrativo de Minas y Energía. (2015). *Decreto 1073 de 2015*. Bogotá, Colombia: Gobierno de Colombia. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77887>
- Toala, M. O. (2013). *Inspección física y análisis estructural para determinar la operatividad de un tanque cilindrico vertical para almacenamiento de fuel oil de acuerdo a la norma API 653 luego de un siniestro*. Guayaquil.
- Toledo Alvarado, L., & Espinoza Leon, L. (2024). *Incremento de la productividad mejorando la disponibilidad de tanques de almacenamiento empleando ingeniería de métodos en una planta de abastecimiento de hidrocarburo*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/675579>

Torres, I. S. (2014). *Diseño y análisis de un sistema de contingencia en el ducto peruano de líquidos de gas natural NGL – Sector Sierra*. Lima , Perú . Obtenido de <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/411>