

# **Tendencias tecnológicas de inspección enfocadas en la industria petrolera**

Daniel Fernando Cano Suarez

Asesor

Duber Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

2024

## Resumen

La industria petrolera incluye dentro de sus actividades la perforación, construcción de yacimientos, mantenimiento de pozos, servicios de producción, refinación y el transporte de productos derivados del petróleo. Cada una de estas actividades depende críticamente de la integridad y eficiencia de su infraestructura. Por lo tanto, los avances en las tecnologías de inspección toman un papel fundamental para prevenir fallas, garantizar la seguridad de trabajadores y proteger el medio ambiente.

En la monografía se plantea una revisión documental de las tendencias en métodos y técnicas de inspección utilizados en la industria petrolera. A partir de allí, se establecerán categorías, análisis comparativos, ventajas, limitaciones y el impacto en la eficiencia operativa de dichas técnicas. En este caso, se resalta la innovación tecnológica, como el uso de drones, robots y técnicas de inteligencia artificial, que promete revolucionar las prácticas de inspección al ofrecer nuevas posibilidades para la seguridad y el monitoreo ambiental. Como conclusión, se describe que la tecnología de inspección innovadora está transformando la industria petrolera al permitir una visualización más allá de lo visible, utilizando tecnologías avanzadas como inspecciones remotas, drones, realidad aumentada, inteligencia artificial y sensores inteligentes, las compañías petroleras pueden mejorar la eficiencia operativa, garantizar la seguridad de los empleados y los activos. Así mismo, con esta revisión bibliográfica no solo consolidar el conocimiento existente, sino también identificar oportunidades para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos afines con el programa de ingeniería Electrónica.

***Palabras clave:*** Industria petrolera, inspección no destructiva, control inteligente, innovación tecnológica.

## **Abstract**

The oil industry includes drilling, field construction, well maintenance, production services, refining, and the transportation of petroleum products among its activities. Each of these activities critically depends on the integrity and efficiency of its infrastructure. Therefore, advances in inspection technologies play a fundamental role in preventing failures, ensuring worker safety, and protecting the environment.

The monograph presents a documentary review of the trends in inspection methods and techniques used in the oil industry. From there, categories, comparative analyses, advantages, limitations, and the impact on the operational efficiency of these techniques will be established. In this case, technological innovation is highlighted, such as the use of drones, robots, and artificial intelligence techniques, which promise to revolutionize inspection practices by offering new possibilities for safety and environmental monitoring. In conclusion, it is described that innovative inspection technology is transforming the oil industry by allowing visualization beyond the visible, using advanced technologies such as remote inspections, drones, augmented reality, artificial intelligence and smart sensors, oil companies can improve operational efficiency, ensure the safety of employees and assets. Likewise, this bibliographic review not only consolidates existing knowledge, but also identifies opportunities for future research and technological developments related to the Electronic Engineering program.

**Keywords:** Oil industry, non-destructive inspection, intelligent control, technological innovation.

## Tabla de Contenido

Introducción.....	9
Descripción del problema.....	12
Planteamiento del problema .....	12
Justificación .....	15
Objetivos.....	17
Objetivo general.....	17
Objetivos específicos .....	17
Marco conceptual y teórico .....	18
Sector petrolero .....	18
Red de tubería petrolera .....	19
Tipos de defectos más comunes .....	23
Inspección no destructiva .....	25
Tipos de inspección.....	26
Metodología.....	28
Fases de la investigación .....	29
Fuentes de información y criterios de selección de datos .....	32
Resultados.....	33
Síntesis de la literatura sobre las tendencias de técnicas y herramientas de inspección utilizadas en la industria petrolera.....	33

Aspectos técnicos y recursos de los principales métodos empleados en las labores de inspección en la industria petrolera. ....	38
Inspección no destructiva.....	39
Avances tecnológicos convencionales empleados en la inspección en la industria del petróleo.....	40
Importancia de las nuevas tecnologías de inspección en la industria del petróleo .....	64
Análisis comparativo entre las técnicas de inspección de la industria petrolera .....	76
Flujograma de las técnicas de inspección .....	87
Importancia de la innovación tecnológica enfocada a la inspección en la industria petrolera, así como su potencial aplicabilidad y beneficios en otros sectores.....	91
Realidad aumentada y realidad virtual en la inspección de activos.....	93
Inspecciones basadas en inteligencia artificial .....	93
Monitoreo continuo mediante sensores inteligentes:.....	93
Uso de drones.....	94
Casos prácticos .....	96
Temas de investigación actuales en inspección .....	98
Conclusiones.....	103
Bibliografía.....	105

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Algoritmos y Resultados de la Búsqueda</i> .....	33
<b>Tabla 2</b> <i>Clasificación Según Autores</i> .....	42
<b>Tabla 3</b> <i>Tipos de Inspección Visual</i> .....	45
<b>Tabla 4</b> <i>Ventajas y Desventajas de la Inspección Visual</i> .....	47
<b>Tabla 5</b> <i>Ventajas y Desventajas de la Inspección por Líquidos Penetrantes</i> .....	49
<b>Tabla 6</b> <i>Ventajas y Desventajas de la Inspección Magnética</i> .....	52
<b>Tabla 7</b> <i>Ventajas y Desventajas de la Inspección por Ultrasonido</i> .....	54
<b>Tabla 8</b> <i>Ventajas y Desventajas de la Inspección Radiográfica</i> .....	57
<b>Tabla 9</b> <i>Ventajas y Desventajas de Corrientes de Eddy</i> .....	60
<b>Tabla 10</b> <i>Ventajas y Desventajas de la Técnica de Inspección Basada en Riesgos (RBI)</i> ..	62
<b>Tabla 11</b> <i>Ventajas y desventajas de las técnicas de Inspección</i> .....	63
<b>Tabla 12</b> <i>Tipos de Robots usados para la Inspección Petrolera</i> .....	72
<b>Tabla 13</b> <i>Frecuencia de Uso de las Técnicas de Inspección en la Revisión Documental</i> ...	77
<b>Tabla 14</b> <i>Cuadro Comparativo sobre los Tipos de Defectos y la Eficiencia de las Técnicas</i> .....	79
<b>Tabla 15</b> <i>Cuadro Comparativo sobre la Complejidad de cada Técnica de Inspección</i> .....	81
<b>Tabla 16</b> <i>Cuadro Comparativo de la Implementación de las Técnicas de Inspección</i> .....	83
<b>Tabla 17</b> <i>Casos Prácticos en la Industria Petrolera</i> .....	96

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Red de Tubería</i> .....	20
<b>Figura 2</b> <i>Tipos de Inspección</i> .....	27
<b>Figura 3</b> <i>Fases de la Investigación</i> .....	29
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama de Flujo de Búsqueda Documental</i> .....	37
<b>Figura 5</b> <i>Tipos de Inspección no Destructiva</i> .....	39
<b>Figura 6</b> <i>Tipos de Inspección Tecnológicas Convencionales</i> .....	41
<b>Figura 7</b> <i>Fases de la Inspección Visual</i> .....	43
<b>Figura 8</b> <i>Inspección Visual en el Campo</i> .....	44
<b>Figura 9</b> <i>Inspección por Líquidos Penetrantes</i> .....	48
<b>Figura 10</b> <i>Inspección Magnética</i> .....	50
<b>Figura 11</b> <i>Inspección con Ultrasonido</i> .....	53
<b>Figura 12</b> <i>Inspección con Radiografía</i> .....	56
<b>Figura 13</b> <i>Corrientes de Eddy</i> .....	59
<b>Figura 14</b> <i>Innovación Tecnológica en la Industria Petrolera</i> .....	66
<b>Figura 15</b> <i>Inspección con Drones</i> .....	67
<b>Figura 16</b> <i>Inspección con Robots</i> .....	70
<b>Figura 17</b> <i>Inspección con Sensores</i> .....	74
<b>Figura 18</b> <i>Inspección Ultrasonido Contra Radiografía</i> .....	76
<b>Figura 19</b> <i>Tipos de Inspección a Utilizar</i> .....	90
<b>Figura 20</b> <i>Evolución de las Tendencias en la Inspección Petrolera</i> .....	92

## Introducción

La industria petrolera es uno de los sectores más importantes en la economía global, ya que proporciona la principal fuente de energía para el transporte, la industria y la generación de electricidad (Ramírez y Osle, 2017). Sin embargo, la extracción, refinación y transporte de petróleo y sus derivados implican riesgos operativos que pueden afectar la seguridad de los trabajadores, el medio ambiente y la economía (Ogai, 2018). En este sentido, la inspección y mantenimiento de las infraestructuras petroleras son fundamentales para prevenir accidentes y garantizar la eficiencia en la producción y distribución de energía.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2020), la industria petrolera enfrenta desafíos significativos en términos de seguridad y eficiencia, debido a la creciente demanda de energía y la necesidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la implementación de tecnologías de inspección avanzadas se ha convertido en una prioridad para la industria petrolera (Fer, 2021). Estas tecnologías permiten la detección temprana de anomalías y fallas en las infraestructuras petroleras, lo que puede prevenir accidentes y reducir costos de mantenimiento. Sin embargo, la adopción de tecnologías de inspección avanzadas en la industria petrolera enfrenta obstáculos, incluyendo limitaciones técnicas, consideraciones de costo y la necesidad de validación extensiva para asegurar su fiabilidad y eficacia (Hopgood, 2021). En este sentido, es fundamental realizar investigaciones que evalúen la efectividad de las tecnologías de inspección en la industria petrolera y identifiquen las tendencias y desafíos actuales en este campo.

En Colombia, la industria petrolera es un sector estratégico para la economía nacional, y la seguridad de los oleoductos y gasoductos es crucial para la salud pública (Shi et al., 2022). Por lo tanto, es fundamental que la industria petrolera colombiana adopte tecnologías de inspección avanzadas para garantizar la seguridad y eficiencia en la producción y distribución de energía.

Este trabajo de investigación busca evaluar las tendencias tecnológicas actuales en la inspección de infraestructuras petroleras e identificar los desafíos y oportunidades para la adopción de tecnologías de inspección avanzadas en la industria petrolera colombiana. Para lograr este objetivo, se realizará una revisión sistemática de la literatura y se analizarán los resultados de estudios recientes en el campo de la inspección de infraestructuras petroleras.

Este documento de investigación se compone de cinco capítulos que abordan la revisión documental de la inspección de infraestructuras petroleras y la importancia de la innovación tecnológica en este sector. El Capítulo 1, se contempla la descripción del problema que presenta el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación. En este capítulo, se analiza la importancia del sector petrolero y los riesgos asociados a la inspección de infraestructuras petroleras. El Capítulo 2 se da a conocer el marco conceptual y teórico que proporciona una revisión de la literatura sobre el sector petrolero, la red de tubería petrolera, los tipos de defectos más comunes y las técnicas de inspección no destructiva. Este capítulo sentó las bases teóricas para la investigación.

En el Capítulo 3 se describe la metodología donde se determinaron las fases de la investigación, las fuentes de información y los criterios de selección de datos. En este

capítulo, se detalla el enfoque metodológico utilizado para recopilar y analizar la información.

El Capítulo 4 de resultados se presentaron los hallazgos de la investigación, incluyendo la síntesis de la literatura sobre las tendencias de técnicas y herramientas de inspección utilizadas en la industria petrolera, los aspectos técnicos y recursos de los principales métodos empleados en las labores de inspección y el análisis comparativo entre las técnicas de inspección. Además, se analiza la importancia de la innovación tecnológica enfocada a la inspección en la industria petrolera y su potencial aplicabilidad y beneficios en otros sectores.

Finalmente, se tienen las conclusiones que resume los principales hallazgos de la investigación y presenta las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

En general, este documento de investigación proporciona una visión integral de la problemática de la inspección de infraestructuras petroleras y la importancia de la innovación tecnológica en este sector, lo que puede ser de utilidad para profesionales y académicos interesados en el campo de la inspección y mantenimiento de infraestructuras petroleras.

## **Descripción del Problema**

### **Planteamiento del Problema**

La industria petrolera tiene un gran impacto global sobre la economía, el medio ambiente e incluso la política internacional, con países y compañías que ejercen una influencia significativa en la política monetaria global a través de su capacidad de producción y exportación de petróleo (Ramírez y Osle, 2017). La importancia del petróleo radica en ser la principal fuente de energía utilizada en el transporte, la industria y la generación de electricidad, además de ser empleado como materia prima en la fabricación de una amplia gama de productos; entre los cuales se incluyen la producción de plásticos, fertilizantes, productos químicos, farmacéuticos, asfalto, lubricantes y muchos otros de uso cotidiano (Ogai, 2018).

La infraestructura involucrada en las diferentes etapas de la industria petrolera, tales como la extracción, refinación y transporte, está sujeta a una variedad de amenazas que incluyen corrosión, fatiga y daños físicos, lo que puede llevar a fallos catastróficos. Esta gran necesidad de mantener la red de tuberías y demás elementos en perfectas condiciones ha obligado a innovar los métodos de evaluación, lo que ha dado lugar a diversas y nuevas tecnologías de inspección no destructiva que faciliten el monitoreo, la recolección de datos y detección de fallas en las tuberías y otros elementos. Debido a la dificultad para la realización de mantenimiento en las estructuras de las refinerías, se implementan múltiples tendencias tecnológicas para facilitar las tareas de monitoreo e inspección en alturas y lugares de difícil acceso o condiciones ambientales adversas para el ser humano (Fer, 2021). Desarrollos como robots o drones no tripulados con capacidad de adherirse a la superficie o sobrevolarla, en combinación con una gran variedad de sensores, permiten el

análisis de las estructuras y la visualización de datos en tiempo real, así como asegurar la integridad de los trabajadores. No obstante, la adopción de estas tecnologías enfrenta obstáculos, incluyendo limitaciones técnicas, consideraciones de costo y la necesidad de validación extensiva para asegurar su fiabilidad y eficacia.

Colombia es un importante productor de petróleo, por lo que el buen uso y mantenimiento de las redes son fundamentales para la seguridad energética y el sector del transporte del país (Hopgood, 2021). Además, la seguridad de los oleoductos y gasoductos es crucial para la salud pública (Shi et al., 2022). Por esta razón, la industria petrolera colombiana debe emplear tecnologías de inspección a la par con las utilizadas por los principales productores internacionales. Del análisis que surja de este trabajo de monografía, se espera ofrecer una visión general sobre la actualización de la tecnología de inspección utilizada en Colombia en comparación con las prácticas internacionales en la industria petrolera.

Gran parte del proceso actual de realización de las inspecciones involucra la interacción humana, lo que las hace costosas y riesgosas tanto para los operarios como para el medio ambiente. Por otra parte, las limitaciones del ser humano pueden hacer que se pasen por alto defectos no visibles a simple vista (Alharam, 2020). Ignorar estos problemas puede resultar en accidentes con significativas pérdidas económicas y humanas. El estudio de la monografía propuesta busca, por lo tanto, identificar y analizar las tendencias tecnológicas emergentes en la inspección de tuberías y otros elementos. Se investigarán las ventajas, desafíos y aplicabilidad, evaluando de esta forma, su potencial para mejorar la seguridad operativa, la eficiencia y la sostenibilidad en la industria petrolera. Ante esto, se plantea la pregunta de investigación: ¿Cómo se pueden identificar y categorizar las

tendencias tecnológicas actuales y futuras en las técnicas de inspección utilizadas en la industria petrolera, a través de un análisis documental?

## **Justificación**

Dada la importancia de la industria petrolera en la economía mundial, por su rol fundamental en la generación de energía y en la producción de materias primas para una amplia gama de productos industriales y de consumo, se requiera la implementación de infraestructuras adecuadas para la exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización del petróleo y sus derivados. Sin embargo, cada una de estas etapas implica riesgos operativos que pueden afectar tanto a la integridad de los operarios como al medio ambiente.

Para minimizar potenciales accidentes, es vital la detección temprana de cualquier tipo de anomalía que comprometa la integridad de las estructuras. Con este fin, se hace imprescindible realizar tareas constantes de inspección. Aunque muchas de estas labores de inspección aún se realizan manualmente, cada vez es más frecuente y necesario el uso de tecnologías innovadoras para automatizar estos procedimientos, lo que permite minimizar riesgos, así como alcanzar puntos inaccesibles para los operarios.

En los últimos años, se han propuesto una gran variedad de técnicas de inspección no destructiva, incluyendo métodos convencionales como la inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, radiografía y corrientes de Eddy (Rosas, 2019); pasando a métodos más avanzados, como el uso de drones y robots equipados con visión artificial y modelos de aprendizaje profundo, los cuales permiten automatizar significativamente la labor de inspección (Jara, 2022).

La diversidad de técnicas, sensores e instrumentación empleados en las labores de inspección de la industria petrolera hace que un estudio documental, complementado con

un análisis detallado, sea particularmente relevante y atractivo para exponer las ventajas, alcances y limitaciones de los distintos enfoques. Este estudio monográfico no sólo resultará de gran utilidad y beneficio a los profesionales directamente relacionados con la industria petrolera, sino en general a aquellos en el campo de la Ingeniería Electrónica y áreas relacionadas, por tratarse de tecnologías transversales aplicables en otros ámbitos distintos al sector petrolero.

En resumen, la propuesta de monografía es pertinente y valiosa, entre otros, por los siguientes aspectos:

Dada la amplia variedad de métodos y equipos utilizados para la inspección de infraestructura en la industria petrolera, sería valioso contar con un documento que compile esta información y que, mediante una revisión rigurosa y un estudio detallado de documentos científicos, establezca las ventajas, alcances y limitaciones de los distintos enfoques, bajo un análisis comparativo que pueda enriquecer las prácticas de seguridad industrial en el ámbito petrolero.

El documento aportará un recurso bibliográfico novedoso que facilitará el reconocimiento de las tendencias actuales en técnicas y herramientas de inspección en la industria petrolera. Sin embargo, su utilidad no se limita a las entidades o personas interesadas en esta industria en particular, sino que puede servir de referente a estudiantes y profesionales de Ingeniería Electrónica y ramas afines. La información contemplada en la monografía es transversal para varios de los cursos del plan de estudio del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad UNAD.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Realizar un análisis documental detallado sobre las tendencias tecnológicas en materia de inspección de infraestructuras, con enfoque en la industria petrolera.

### **Objetivos Específicos**

Revisar el estado del arte y sintetizar la literatura relevante sobre las tendencias de técnicas y herramientas de inspección utilizadas en la industria petrolera.

Explorar los aspectos técnicos y recursos más relevantes de los principales métodos empleados en las labores de inspección en la industria petrolera.

Comparar de manera sistemática y clasificar las técnicas de inspección convencionales y no convencionales utilizadas en la industria petrolera, identificando sus características distintivas y aplicaciones específicas.

Crear cuadros comparativos donde se consoliden las ventajas y desventajas de los distintos tipos de técnicas y equipos usados en la inspección de infraestructuras petroleras.

Analizar la importancia de la innovación tecnológica enfocada a la inspección en la industria petrolera, así como su potencial aplicabilidad y beneficios en otros sectores.

## **Marco Conceptual y Teórico**

La industria de inspección de petróleo opera con estándares rigurosos destinados principalmente a garantizar que los equipos funcionen de manera eficiente mientras se mantiene la seguridad en el lugar de trabajo (Yu et al., 2019). La industria de petróleo incluye dentro de las actividades la perforación (tanto en tierra como en alta mar), la construcción de yacimientos, el mantenimiento de pozos, los servicios de producción, la refinación y el transporte de productos derivados del petróleo, lo que hace necesario garantizar que los equipos, máquinas y elementos funcionen adecuadamente (Saha, et al., 2018).

En este contexto, es fundamental considerar la evolución de la ciencia y tecnología para cumplir con los estándares de la industria, así como garantizar la seguridad en el lugar de trabajo y proteger a los trabajadores de los peligros. Este estado del arte, por lo tanto, se desarrolla con el propósito de recopilar información pertinente y confiable sobre los métodos, tecnologías e innovaciones empleadas en la inspección dentro de la industria petrolera.

### **Sector Petrolero**

El sector del petróleo y el gas es uno de los pilares de la sociedad moderna. En el Energy Outlook de 2018, British Petroleum (BP) proyectó un aumento constante en el consumo absoluto de petróleo y gas hasta 2040. El equipo utilizado en la exploración, producción, almacenamiento, transporte y distribución en la industria del petróleo y el gas es un activo valioso. Si no se les da el mantenimiento adecuado, su falla puede tener consecuencias devastadoras tanto para el medio ambiente como para la sociedad. Por lo

tanto, las inspecciones periódicas y precisas son necesarias, no solo para la producción sino también para la seguridad (Yu et al., 2019).

### **Red de Tubería Petrolera**

La tubería es un componente clave en la perforación, producción y transporte en la industria del petróleo (Zhao et al., 2020). Sin embargo, factores como la vibración, la corrosión y el daño por fatiga hacen que las tuberías sean propensas a agrietarse (Mattar y Kalai, 2018).

Las líneas de flujo de petróleo fueron el primer sistema de "tuberías" conectadas a la cabeza del pozo. Estas tuberías que tienen un diámetro de 5 a 30,5 cm están sujetas a diferentes tipos de defectos que pueden comprometer su seguridad y eficiencia, tales como corrosión, grietas, fugas, bloqueos e irregularidades en la superficie (Chhabhaiya et al., 2023). Los oleoductos son el medio de transporte más seguro, sin embargo, las tuberías pueden romperse ocasionalmente. Los oleoductos y gasoductos transportan materiales inflamables y altamente peligrosos, y las rupturas o fallas pueden causar explosiones, incendios, liberación de gases tóxicos, muerte, daños a la propiedad y peligros ambientales (Vahdati, 2020).

## Figura 1

### *Red de Tubería*



*Nota.* Tomado de Inspección de oleoductos en tiempo real basada en IA mediante drones para las industrias de petróleo y gas en Bahréin, (2024). [https://www.freepik.es/fotos-premium/inspeccion-trabajador-masculino-vista-superior-valvula-industria-petroleo-gas-tuberia-registro-verificacion-visual\\_16313822.htm](https://www.freepik.es/fotos-premium/inspeccion-trabajador-masculino-vista-superior-valvula-industria-petroleo-gas-tuberia-registro-verificacion-visual_16313822.htm)

A medida que se instalan nuevos oleoductos entre ciudades e incluso países, la longitud total de los oleoductos aumenta significativamente. La confiabilidad y la fidelidad son consideraciones fundamentales en el proceso de diseño de tuberías. Sin embargo, debido a diversos factores como el golpe de ariete, la corrosión, la carga de tráfico, el movimiento del suelo, etc., no se puede dejar de lado la posibilidad de fugas durante la vida útil de la tubería. Fugas que provocan hechos trágicos con graves consecuencias de pérdida económica y daño ambiental (Aljuaid, 2020).

Por lo tanto, es muy importante realizar inspecciones internas periódicas y trabajos de mantenimiento de las tuberías existentes para garantizar el funcionamiento normal de las tuberías y prevenir accidentes. La detección en la tubería significa que el uso de dispositivos de detección inteligentes no solo puede extender la vida útil de la tubería, sino también reducir el riesgo de incidentes de seguridad en la tubería (Wang et al., 2021).

La literatura sugiere que la inspección de tuberías no es el trabajo más limpio o seguro del mundo porque la inspección de tuberías debe realizar esta importante tarea en condiciones peligrosas y difíciles. Toma tiempo, pero debe ser inspeccionado ya que es propenso a grietas, corrosión y otros problemas que comprometen su integridad.

También deben inspeccionarse periódicamente para garantizar un funcionamiento fiable y la seguridad del personal, los equipos y el medio ambiente (Yang et al., 2021). Las inspecciones son esenciales para monitorear y mantener la integridad de la infraestructura envejecida y al mismo tiempo garantizar que funcione de manera segura sin poner en peligro la salud de los operadores de las instalaciones (Mthimkhulu et al, 2023).

### **Tipos de Tuberías más Comunes**

- Tuberías de acero al carbono (API 5L): Son las más comunes en la industria petrolera y de gas, utilizadas para la perforación, producción y transporte de petróleo y gas (API, 2020).

- Tuberías de acero inoxidable (SS): Se utilizan en aplicaciones donde la corrosión es un problema, como en la producción de petróleo y gas en aguas profundas (SSINA, 2020).

- Tuberías de fibra de vidrio (GRP): Se utilizan en aplicaciones donde se requiere resistencia a la corrosión y alta durabilidad, como en la producción de petróleo y gas en ambientes agresivos (ASTM, 2020).

### **Diámetros**

- Tuberías de 5 a 30,5 cm (2 a 12 pulgadas): Se utilizan para la producción y transporte de petróleo y gas (API, 2020).

- Tuberías de 30,5 a 60,3 cm (12 a 24 pulgadas): Se utilizan para la transmisión de petróleo y gas a largas distancias (ASME, 2020).

- Tuberías de 60,3 a 121,9 cm (24 a 48 pulgadas): Se utilizan para la transmisión de petróleo y gas en grandes cantidades (API, 2020).

### **Tipos de Materiales**

- Acero al carbono (API 5L): Es el material más común utilizado en la industria petrolera y de gas (API, 2020).

- Acero inoxidable (SS): Se utiliza en aplicaciones donde la corrosión es un problema (SSINA, 2020).

- Fibra de vidrio (GRP): Se utiliza en aplicaciones donde se requiere resistencia a la corrosión y alta durabilidad (ASTM, 2020).

- Plástico (PE, PVC, etc.): Se utiliza en aplicaciones donde se requiere flexibilidad y resistencia a la corrosión (ASTM, 2020).

### **Grosor**

- Tuberías de acero al carbono: 3,2 a 25,4 mm (1/8 a 1 pulgada) (API, 2020).
- Tuberías de acero inoxidable: 3,2 a 12,7 mm (1/8 a 1/2 pulgada) (SSINA, 2020).
- Tuberías de fibra de vidrio: 3,2 a 12,7 mm (1/8 a 1/2 pulgada) (ASTM, 2020).

### **Tipos de Defectos más Comunes**

**Corrosión:** La corrosión es un proceso de deterioro químico que ocurre cuando los materiales entran en contacto con sustancias químicas agresivas, como el agua de mar, el ácido sulfúrico o el cloruro de hidrógeno (Fontana, 2021). La corrosión puede llevar a la formación de grietas, fugas o fallas en las tuberías y equipos (Uhlig, 2021). La corrosión puede ser clasificada en diferentes tipos, incluyendo la corrosión uniforme, la corrosión localizada y la corrosión galvánica (NACE, 2020).

**Grietas:** Las grietas pueden ocurrir debido a tensiones mecánicas, fatiga del material o defectos de fabricación (Hertzberg, 2019). Las grietas pueden ser superficiales o profundas y pueden propagarse rápidamente, lo que puede llevar a fallas catastróficas (Broek, 2019). La detección temprana de grietas es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (API, 2020).

**Fugas:** Las fugas pueden ocurrir debido a corrosión, grietas o defectos en las conexiones (ASME, 2020). Las fugas pueden ser peligrosas, ya que pueden liberar sustancias químicas peligrosas o inflamables (OSHA, 2020). La detección temprana de fugas es crucial para prevenir accidentes y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (API, 2020).

**Obstrucciones:** Las obstrucciones pueden ocurrir debido a la acumulación de sedimentos, parafina u otros materiales, pueden reducir la eficiencia de las operaciones y aumentar el riesgo de fallas (NACE, 2020). La detección temprana de obstrucciones es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (ASME, 2020).

**Desgaste:** El desgaste puede ocurrir debido al uso y manipulación de los equipos y tuberías, puede llevar a la formación de grietas o fallas en las superficies de contacto (Broek, 2019). La detección temprana de desgaste es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (API, 2020).

**Daños mecánicos:** Los daños mecánicos pueden ocurrir debido a impactos, dobleces o torsiones, pueden ser causados por accidentes, errores de manipulación o fallos en los sistemas de sujeción (OSHA, 2020). La detección temprana de daños mecánicos es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (API, 2020).

**Defectos de soldadura:** Los defectos de soldadura pueden ocurrir debido a errores en el proceso de soldadura, como la falta de penetración, la porosidad o la falta de fusión (AWS, 2020). Estos pueden llevar a la formación de grietas o fallas en las superficies de contacto. La detección temprana de defectos de soldadura es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (Hertzberg, 2019).

**Pitting:** es una forma de corrosión que se caracteriza por la formación de pequeñas cavidades en la superficie del material (NACE, 2020), puede ocurrir debido a la exposición

a sustancias químicas agresivas o a la presencia de defectos en la superficie del material. La detección temprana de pitting es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (ASME, 2020).

**Erosión:** La erosión puede ocurrir debido a la acción de fluidos o gases a alta velocidad (ASME, 2020), puede llevar a la formación de grietas o fallas en las superficies expuestas. La detección temprana de erosión es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (API, 2020).

**Fatiga del material:** La fatiga del material puede ocurrir debido a la repetición de cargas y descargas. La fatiga del material puede llevar a la formación de grietas o fallas en las superficies de contacto (Broek, 2019). La detección temprana de fatiga del material es crucial para prevenir fallas y garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria petrolera (API, 2020).

### **Inspección no Destructiva**

La inspección no destructiva implica verificar la calidad de una pieza o material sin dañarlo o alterarlo de ninguna manera; incluye pruebas no destructivas (NDT), Inspección no destructivas (NDI) y exámenes no destructivos (NDE). Las actividades relacionadas con la evaluación incluyen, en primer lugar, observar dentro de un objeto o medir alguna propiedad para identificar dónde tiene irregularidades, discontinuidades o errores (Zhao, 2020). Estas pruebas se utilizan para determinar la resistencia física de un material sin afectar su utilidad. La evaluación no destructiva es una herramienta que puede ayudar a garantizar seguridad, calidad y confiabilidad, aumentar la productividad, reducir el riesgo, proteger el medio ambiente y reducir los costos (Rosas, 2019).

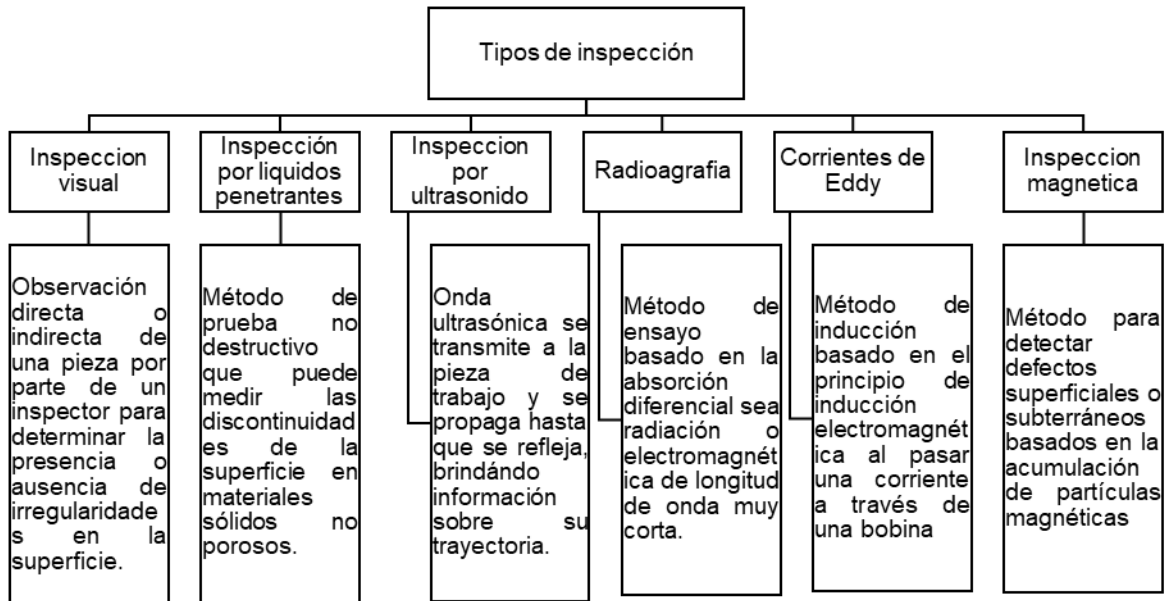
En cuanto a esta inspección, se pueden determinar varios tipos, entre los que se encuentran: Inspección visual (VT), Líquido Penetrante (PT), Partículas Magnéticas (MT), Electromagnético (ET).

Por otro lado, la inspección en la industria petrolera ha experimentado un cambio significativo en sus tendencias, dando mayor importancia a la innovación tecnológica. Para ello, se contemplan diversos métodos de inspección basados en el múltiple tipo de sensores. Las técnicas de inspección más utilizadas en la industria se pueden clasificar típicamente en: Inspección visual, inspección por ultrasonidos, inspección magnética y la inspección de corrientes de Eddy (Yu et al., 2019).

Así mismo, Aljuaid et al, (2020) plantean que existen múltiples formas de inspección que se clasifican según diferentes categorías: sistemas simples, sistemas basados en computadora y sistemas de monitoreo. Otro tipo de clasificación divide entre métodos visuales, exteriores e interiores.

### **Tipos de Inspección**

Dentro de los tipos de inspección se encuentran:

**Figura 2***Tipos de Inspección*

*Nota.* Tipos de inspección. Elaboración propia. (2024). Tomado de Yu et al., (2019), Rosas, (2019), Carballini y Viana, (2015), De Verger, (2017) y Vahdati, (2020).

## **Metodología**

La metodología propuesta consistirá en una búsqueda exhaustiva y revisión de la literatura científica y técnica relacionada con las tendencias en métodos y técnicas de inspección utilizados en la industria petrolera. Se incluirán diversos tipos de fuentes como estudios, artículos de revistas especializadas, conferencias, informes técnicos, tesis, memorias de eventos científicos, libros y manuales. Una vez recopilada la información relevante, se procederá a sintetizarla para identificar las tendencias más significativas y los últimos avances tecnológicos en el campo de la inspección de infraestructuras petroleras considerando el impacto y la aplicación de la ingeniería electrónica en el proceso.

Seguidamente, se explorarán en detalle los aspectos técnicos y recursos más relevantes de los principales métodos empleados en la industria petrolera para la inspección de infraestructuras. Esto incluirá tanto técnicas convencionales como no convencionales, analizando tanto sus características distintivas como aplicaciones específicas.

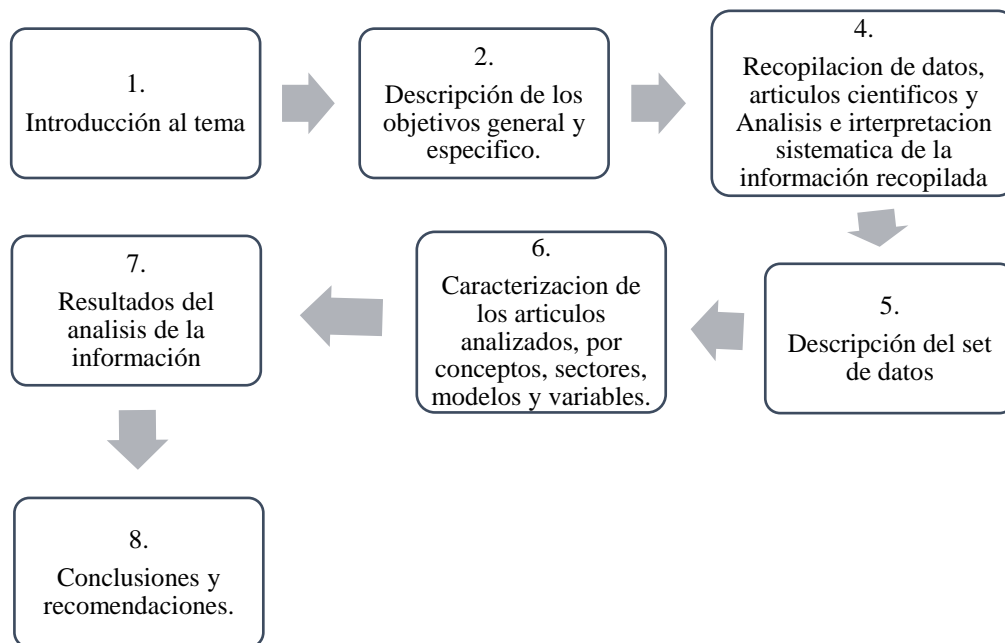
Posteriormente, se llevará a cabo una comparación sistemática entre las técnicas de inspección convencionales y no convencionales utilizadas en la industria petrolera. Se identificarán y clasificarán sus ventajas, desventajas y aplicaciones específicas para proporcionar una visión global de las opciones disponibles. Finalmente, se analizará la importancia de la innovación tecnológica enfocada a la inspección en la industria petrolera, incluyendo métodos propios de la automatización y la robótica industrial, así como su potencial aplicabilidad y beneficios en otros sectores. Así mismo, se examinará cómo estas innovaciones pueden mejorar la seguridad operativa, la eficiencia y la sostenibilidad en la industria petrolera y en otros campos relacionados.

## Fases de la Investigación

La investigación a partir del estudio del estado de arte se desarrolló mediante las siguientes fases que direccionan y ordenan los resultados y su análisis.

**Figura 3**

*Fases de la Investigación*



*Nota.* Fases de la investigacion. Elaboración propia, (2024).

## Introducción al Tema

La introducción de la investigación se centró en la necesidad de explorar nuevas tecnologías de inspección en la industria petrolera. Además, se destacó la importancia de la investigación, considerando la relevancia del tema planteado y su impacto en el campo.

## **Descripción de los Objetivos**

La descripción de los objetivos es importante porque ayuda a enfocar la búsqueda de información relevante y a evitar la dispersión en la recopilación de datos. También delimita el alcance de la investigación y establece los límites de lo que se va a investigar, sirviendo como guía para la revisión documental y asegurando que se analicen los documentos relevantes y se extraiga la información necesaria. Además, ayuda a estructurar la investigación y organizar la información de manera lógica y coherente, permitiendo evaluar la relevancia de la información encontrada y determinar si se ajusta a los propósitos de la investigación.

## **Recopilación de Datos, Artículos Científicos**

Los artículos por analizar se obtienen a partir de motores de búsqueda como google académico, scielo, Science direct; mediante palabras clave en relación con los temas de investigación, se clasificaron mediante el año, antecedente, autor, tema específico y general.

## **Análisis e Interpretación Sistemática de la Información Recopilada**

El análisis e interpretación sistemática de la información recopilada es un paso crucial, que implica examinar y evaluar la información recopilada de manera detallada y organizada, con el fin de identificar patrones, tendencias y relaciones entre los datos. Durante este proceso, se debe considerar la calidad y validez de la información recopilada, la relevancia de la información para los objetivos de la investigación, la consistencia y coherencia de la información, y las posibles limitaciones y sesgos en la información.

El análisis e interpretación sistemática de la información recopilada permite identificar los hallazgos más importantes y relevantes, establecer conexiones entre los datos

y los objetivos de la investigación, desarrollar conclusiones y recomendaciones basadas en la evidencia, y evaluar la calidad y validez de los hallazgos. En cuanto a este análisis, se realizó mediante el uso de tablas y gráficos que identifica la información más importante de cada uno de los estudios investigados.

### **Descripción del Conjunto de Datos**

La descripción del conjunto de datos se realizará mediante una tabla donde se recopila, analiza y organiza toda la información respecto a los artículos.

### **Caracterización de los Artículos Analizados, por Conceptos, Sectores, Modelos y Variables**

La caracterización de los artículos se realizará mediante factores relevantes para la investigación, lo que conlleva a identificar los conceptos, factores, elementos, prácticas de referencia, innovación y métodos utilizados en la inspección en la industria del petróleo.

### **Resultados del Análisis de la Información**

Los resultados se presentan como el producto del análisis y la finalización de cada una de las fases descritas anteriormente, en cumplimiento de los objetivos planteados.

### **Conclusiones y Recomendaciones**

El trabajo finaliza con las conclusiones, destacando los aspectos más relevantes de la investigación, en cumplimiento con los objetivos planteados. Adicionalmente, se proponen recomendaciones orientadas hacia trabajos futuros de acuerdo con línea de investigación establecida en el documento.

## **Fuentes de Información y Criterios de Selección de Datos**

Esta investigación está basada en la información obtenida de documentos y datos contenidos en repositorios de publicaciones académicas y científicas. El principal motor de búsqueda utilizado fue *Google Scholar*.

Los criterios que se tuvieron en cuenta para seleccionar el material bibliográfico fueron:

- Año de publicación, se tuvo en cuenta artículos y documentos recientes.
- Tipo de documento, que fueran artículos científicos, tesis, memorias de eventos científicos, libros, manuales o informes técnicos de entidades reconocidas dentro del área objeto de estudio.
- Idioma, en español e inglés.
- Enfoque, documentos relacionados con la inspección de la industria del petróleo.

## **Resultados**

### **Síntesis de la Literatura Sobre las Tendencias de Técnicas y Herramientas de Inspección Utilizadas en la Industria Petrolera**

En este apartado se describe la metodología de búsqueda utilizada para reunir el conjunto de documentos sobre los que se elaboró la revisión documental. Para lograr una búsqueda estructurada se utilizaron un conjunto de ecuaciones de búsqueda conformadas a partir del siguiente conjunto de sub-cadenas.

#### ***En Inglés***

1. (Review OR survey)
2. (Oil OR hydrocarbon OR petroleum)
3. (Damage OR defects OR Leak OR corrosion OR crack OR failure)
4. (inspection OR detection OR estimation OR monitoring OR tests OR evaluation OR classification OR identification)
5. (Recent OR trends OR tendencies OR developments OR Innovations OR advances OR technologies)

#### ***En Español***

6. (Análisis de amenazas OR Análisis de daños en tuberías)
7. (innovaciones tecnológicas OR tendencias tecnológicas)
8. (nuevas tecnologías OR Drones OR inspecciones por robots)
9. (Técnicas no destructivas OR inspección en línea)
10. (Innovaciones tecnológicas en la industria petrolera OR Tendencias tecnológicas en la industria petrolera OR Aplicabilidad de las nuevas tecnologías)

11. (Inspección en la industria petrolera OR Tipos de inspección de tuberías OR técnicas de inspección)

12. (proceso de implantación de robots OR robot de inspección de tuberías)

El motor de búsqueda utilizado fue el Google Scholar. En la tabla 1 se indican los algoritmos de búsqueda utilizados bajo diferentes combinaciones de palabras clave y los respectivos resultados arrojados.

**Tabla 1**

*Algoritmos y Resultados de la Búsqueda*

Algoritmo	Ecuación	Resultados de la búsqueda	Artículos y documentos seleccionados
allintitle: (1) AND (2) AND (3)	allintitle: (review OR survey) AND (oil OR hydrocarbon OR petroleum) AND (damage OR defects OR Leak OR corrosion OR crack OR failure)	224	85
allintitle: (2) AND (3) AND (5)	allintitle: (Recent OR trends OR tendencias OR developments OR Innovations OR advances OR technologies) AND (oil OR hydrocarbon OR petroleum) AND (damage OR defects OR Leak OR corrosion OR crack OR failure)	130	56
allintitle: (2) AND (3) AND (4)	allintitle: (oil OR hydrocarbon OR petroleum) AND (damage OR defects OR Leak OR corrosion OR crack OR failure)	810	25

Algoritmo	Ecuación	Resultados de la búsqueda	Artículos y documentos seleccionados
	AND (inspection OR detection OR estimation OR monitoring OR tests OR evaluation OR classification OR identification)		
En el título: (6) AND (7) AND (9) AND (11)	En el título: (Análisis de amenazas OR Análisis de daños en tuberías) AND (innovaciones tecnológicas OR tendencias tecnológicas) AND (Técnicas no destructivas OR inspección en línea) AND (Inspección en la industria petrolera OR Tipos de inspección de tuberías OR técnicas de inspección)	705	96
En el título: (8) AND (9) AND (11)	En el título: (nuevas tecnologías OR Drones OR inspecciones por robots) AND (Técnicas no destructivas OR inspección en línea) AND (Inspección en la industria petrolera OR Tipos de inspección de tuberías OR técnicas de inspección)	925	12
En el título: (10) AND (12) AND (11)	En el título: (Innovaciones tecnológicas en la industria petrolera OR Tendencias tecnológicas en la industria petrolera OR Aplicabilidad de las nuevas tecnologías) AND	1170	84

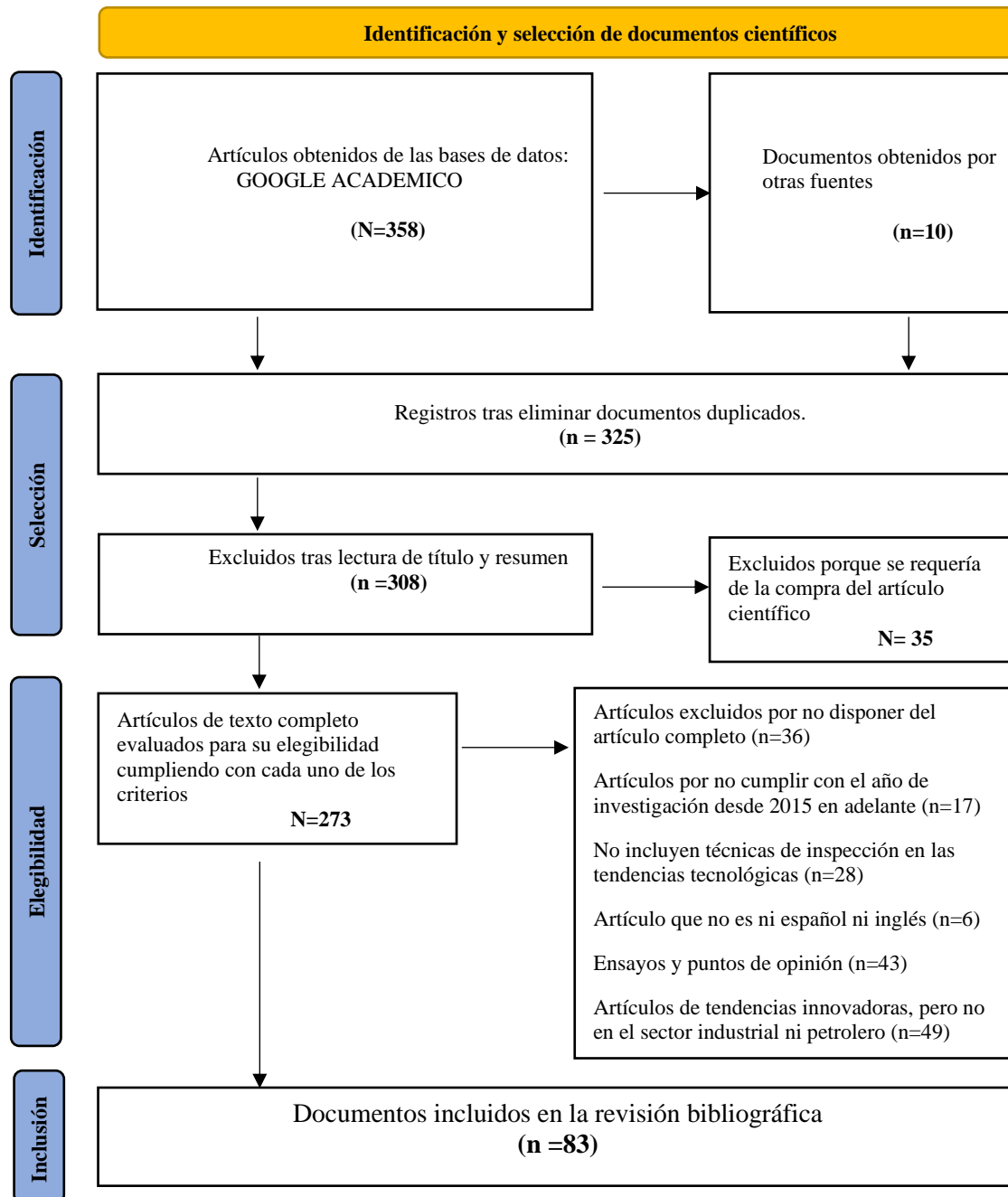
Algoritmo	Ecuación	Resultados de la búsqueda	Artículos y documentos seleccionados
	(proceso de implantación de robots OR robot de inspección de tuberías) AND (Inspección en la industria petrolera OR Tipos de inspección de tuberías OR técnicas de inspección)		
<b>Total</b>		3964	358

*Nota.* Algoritmos y resultados de la búsqueda. Elaboración propia, (2024).

Considerando los criterios de selección de los documentos, la búsqueda en la base de datos arrojó un total de 3964 estudios relacionados. Cada documento fue evaluado para responder a la pregunta de investigación: ¿Cómo se pueden identificar y categorizar las tendencias tecnológicas actuales y futuras en las técnicas de inspección utilizadas en la industria petrolera a través de un análisis documental? En la figura 4 se esquematiza el proceso de filtrado seguido para identificar aquellos que cumplan con cada uno de los criterios.

Figura 4

## Diagrama de Flujo de Búsqueda Documental



Nota. Diagrama de Flujo de Búsqueda Documental. Elaboración propia, (2024).

Teniendo en cuenta la búsqueda en la base de datos, identificación, selección, elegibilidad e inclusión, se toman 83 artículos que cumplen con los criterios de selección de la revisión bibliográfica de los cuales 39 son en Inglés y 34 en español; así mismo 6 son de 2024, 11 son de 2023, 9 de 2022, 16 de 2021, 21 de 2020, 17 de 2019, 8 de 2018, 4 de 2017 y 1 de 2015; en cuanto a la caracterización de cada artículo se realizó una tabla de referencia donde se adjunta el año, autor, nombre del artículo, idioma, tema, resumen y resultados (Ver apéndice tabla de referencia, estado de arte).

### **Aspectos Técnicos y Recursos de los Principales Métodos Empleados en las Labores de Inspección en la Industria Petrolera**

El proceso actual de realización de estas inspecciones está basado principalmente en la interacción humana. Estos procesos se consideran costosos, riesgosos y, en última instancia, pueden dañar el medio ambiente, siendo posible que el defecto no sea visible a simple vista (Alharam, 2020). Ignorar estos problemas puede dar como resultado accidentes con enormes pérdidas económicas y humanas, lo que resalta la necesidad imperiosa de una inspección periódica de las tuberías para mejorar la seguridad y la eficiencia de las plantas industriales (Pushpalatha, 2019).

El proceso de inspección de las plataformas de petróleo y gas es muy importante para la seguridad en el trabajo, siendo necesario considerar varios factores en este proceso tales como: el costo de inspección, la seguridad del personal y la disminución del riesgo para el medio ambiente.

### ***Inspección no Destructiva***

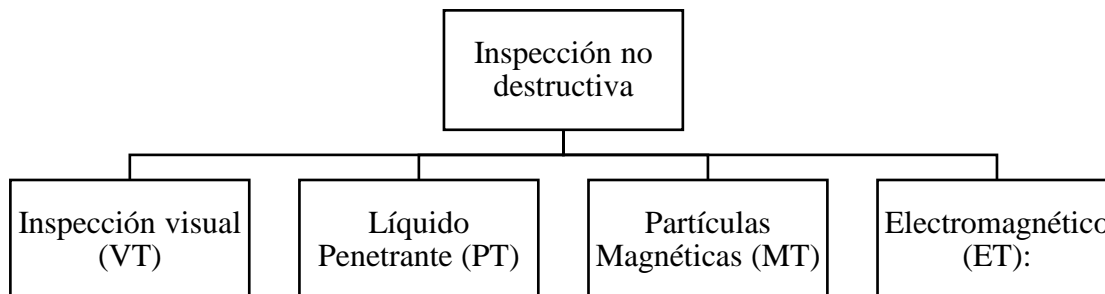
La inspección no destructiva es un método para probar una pieza, material o sistema sin afectar su integridad o utilidad (Allibert et al., 2019); incluyen pruebas no destructivas (NDT), Inspección no destructivas (NDI) y exámenes no destructivos (NDE). Las actividades relacionadas con la evaluación incluyen:

Una prueba, inspección o investigación implica, en primer lugar, observar dentro de un objeto o medir alguna propiedad para identificar posibles irregularidades, discontinuidades o errores. Estas pruebas se utilizan para determinar la resistencia física de un material sin afectar su utilidad. La evaluación no destructiva es una herramienta que puede ayudar a: garantizar seguridad, calidad y confiabilidad, aumentar la productividad, reducir el riesgo, proteger el medio ambiente y reducir los costos (Rosas, 2019).

Dentro de esta forma de inspección, se destacan cuatro tipos de acuerdo con la necesidad de inspección no destructiva superficial o de volumen. A continuación, se describe cada uno.

#### **Figura 5**

*Tipos de Inspección no Destructiva*



*Nota.* Tipos de inspección no destructiva. Elaboración propia, (2024).

Inspección visual (VT): consiste en la observación cuidadosa de la pieza, utilizando dispositivos ópticos como lupas y espejos. Este ensayo no destructivo es el más popular debido a su sencillez y mínimo equipamiento necesario para su uso y ejecución.

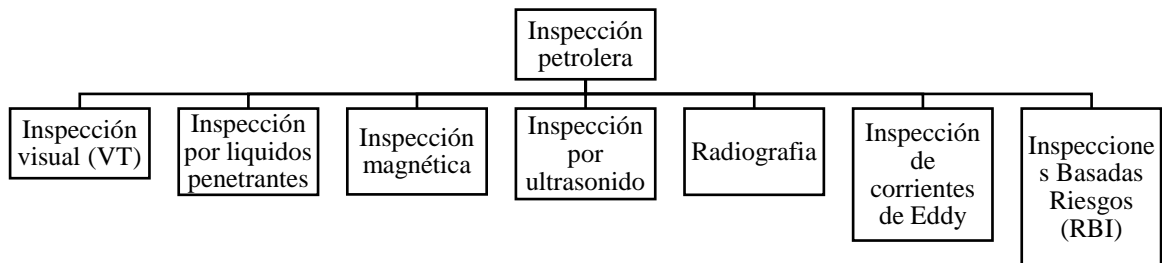
Líquido Penetrante (PT): Este tipo de prueba se basa en el principio de acción capilar. Se aplica un líquido a la superficie limpia de la pieza de trabajo a inspeccionar. Este líquido se introduce en las posibles grietas que pueda haber en el material resaltándolas.

Partículas Magnéticas (MT): Utilizadas en materiales ferromagnéticos basándose en el fenómeno físico del magnetismo. El objetivo es encontrar bajo ciertas condiciones, discontinuidades tanto en la superficie, como ligeramente debajo de esta.

Electromagnético (ET): Las mediciones obtenidas en pruebas electromagnéticas se basan en campos magnéticos generados e inducidos dentro del material bajo prueba. El método más utilizado es el método de las corrientes de Eddy, ya que puede identificar diferentes estados de materiales tanto metálicos como no metálicos (Allibert et al., 2019).

### ***Avances Tecnológicos Convencionales Empleados en la Inspección en la Industria del Petróleo***

Para la inspección en la industria del petróleo, existen muchos métodos para su desarrollo, según los tipos de equipos que se usen; de modo que se pueden dividir aproximadamente en 7 clases, como se indica a continuación en la figura 6 (Yu et al., 2019).

**Figura 6***Tipos de Inspección Tecnológicas Convencionales*

*Nota.* Tipos de inspección tecnológica convencionales. Elaboración propia, (2024).

Así mismo, Aljuaid et al, (2020) plantea que existen múltiples formas de clasificar los tipos de inspección; este autor las clasifica según categorías: sistemas simples, sistemas basados en computadora y sistemas de monitoreo basados en riesgos.

Por otro lado, Rosas (2019) lo clasifica como métodos visuales, exteriores e interiores. Esta clasificación vendría siendo la misma solo que planteada de diferentes formas, en este caso, se describe la inspección visual, ultrasonido, magnética, corrientes de Eddy. A continuación, en la tabla 2 se describe la clasificación según cada autor.

**Tabla 2***Clasificación Según Autores*

Clasificación según Yu et al., (2019)	Clasificación según Aljuaid et al, (2020)	Clasificación según Rosas (2019)
Inspección visual	Sistemas simples	Métodos visuales
Inspección por líquidos penetrantes	Sistemas basados en computadora	(inspección visual) Métodos exteriores
Inspección magnética	Sistemas de monitoreo basados en riesgos	(ultrasonido, magnética)
Inspección por ultrasonido		Métodos interiores
Radiografía		(corrientes de Eddy)
Corrientes de Eddy		

*Nota.* Elaboración propia con base en autores, (2024).

A continuación, se describe cada uno de estos, teniendo en cuenta la clasificación más completa en este caso la de Yu et al., (2019) y anexando la inspección basada en riesgos de Aljuaid et al, (2020).

### **Inspección Visual**

La inspección visual es uno de los medios de inspección más antiguos. En esta los ingenieros tenían que comprobar a simple vista el estado de la infraestructura. Pero con la evolución de la tecnología se implementaron las cámaras mediante las cuales se realiza dicha inspección (Yu et al., 2019).

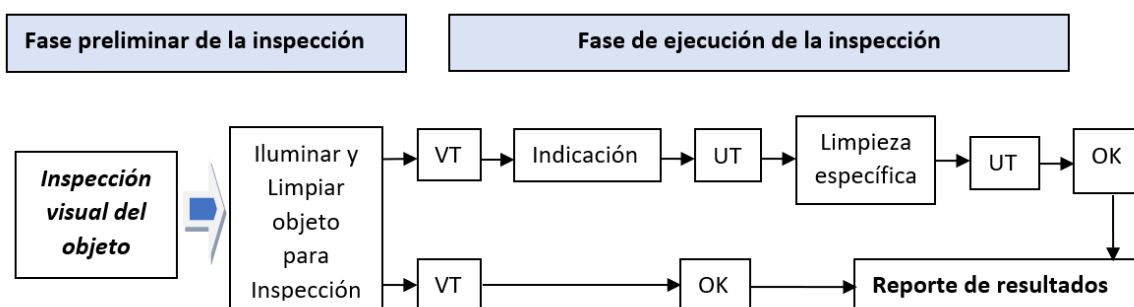
Esta inspección es simple y es una de las más fáciles de realizar; sin embargo, sólo es adecuado para detección de daños en la superficie. Rosas (2019) describe la inspección visual como la observación directa o indirecta de una pieza por parte de un inspector para

determinar el estado general de la pieza mediante la presencia o ausencia de irregularidades en la superficie o decoloración. Es uno de los métodos de inspección de soldaduras más utilizados, permitiendo la observación de defectos superficiales como corrosión, contaminación y acabado superficial. Algunos de los equipos utilizados pueden incluir endoscopios que se utilizan para ver las superficies de los componentes internos que requieren una inspección visual.

Como se puede observar en la figura 7 se muestran las fases de desarrollo para la implementación de esta inspección teniendo un proceso de dos fases, la fase preliminar que consta de iluminar y limpiar el objeto a inspeccionar y la fase de ejecución donde se realiza la inspección cuantitativa que genera los resultados medibles y que sirven para alimentar los criterios de aceptación y rechazo de lo inspeccionado. Este proceso se aplica y se repite cada vez que se requiera inspeccionar un espécimen para la industria de petróleo y gas, por lo que tiende a ser práctico y veraz con el apoyo de procedimientos estandarizados.

**Figura 7**

*Fases de la Inspección Visual*



*Nota.* inspección visual (VT); Inspección visual directa (UT). Tomado de Rosas (2019).

La inspección visual es uno de los diversos métodos de control que utilizan técnicas no destructivas, se puede definir como la inspección de un material, pieza o producto, directamente o con un equipo, para evaluar su conformidad. Esta es la primera prueba de unidades nuevas y existentes, como se puede observar en la figura 8.

### **Figura 8**

#### *Inspección Visual en el Campo*



*Nota.* Tomado de Estado del arte de técnicas no destructivas para inspección de soldadura en tuberías, (2024). [https://www.freepik.es/fotos-premium/inspeccion-trabajador-masculino-tubos-largos-acero-codo-tuberia-fabrica-aceite-estacion-valvula-refineria-industria-petroleo-gas-tuberia-registro-verificacion-visual\\_20038576.htm](https://www.freepik.es/fotos-premium/inspeccion-trabajador-masculino-tubos-largos-acero-codo-tuberia-fabrica-aceite-estacion-valvula-refineria-industria-petroleo-gas-tuberia-registro-verificacion-visual_20038576.htm)

La inspección visual incluye control de calidad de la superficie, detección de defectos superficiales que puedan ocurrir durante la operación. El objetivo es detectar posibles defectos como: desgaste, daños mecánicos, desgaste causado por procesos de fabricación, corrosión, contaminación, roturas de acabados y costuras. Es muy común en

materiales y equipos que componen los activos de la industria petrolera (Escorcía et al., 2021).

En este tipo de inspección se usan dos formas, la inspección directa y la remota.

### Tabla 3

#### *Tipos de Inspección Visual*

Inspección Visual Directa	Inspección visual remota (o indirecta)
Se realiza a una distancia corta del objeto, aprovechando al máximo la capacidad visual natural del inspector. Usualmente puede hacerse cuando el acceso es suficiente para ubicar la vista a una distancia de 24 pulgadas (600 mm), y a un ángulo dentro de 30 grados de la superficie que será examinada.	Es utilizada donde no se puede hacer la inspección visual directa, o en aquellos componentes en los cuales, por su diseño, es muy difícil tener acceso a sus cavidades internas. Por ejemplo, el interior de una tubería o el interior de un tanque sellado, sin necesidad de dismantelar la tubería o tanque.
Los espejos podrán usarse para mejorar el ángulo de visión; también pueden usarse algunas herramientas y equipos auxiliares, tales como: Lupas, espejos, galgas de soldaduras y metros.	El examen visual remoto puede usar elementos auxiliares visuales como: Telescopios, Baroscopios, Robots, Cámaras Zoom u otros instrumentos adecuados; los cuales, deben tener una capacidad de resolución al menos equivalente a la que se obtiene por observación visual directa.

*Nota.* Tomado de Escorcía et al., (2021). Análisis comparativo de juntas soldadas mediante el proceso GMAW con técnicas de inspección visual e inspección visual mediante visión artificial.

En este caso, teniendo en cuenta estas dos formas dentro de la inspección visual, es importante identificar la innovación tecnología para el mismo; donde mediante el uso de drones como herramientas de inspección visual remota (RVI) puede mejorar

significativamente la seguridad de los trabajadores al eliminar la necesidad de su exposición directa. Los drones proporcionan un método eficiente para inspeccionar la infraestructura y también reducen significativamente los costos de inspección en comparación con las inspecciones directas u otras alternativas robóticas (Morales, 2022).

Mediante sus cámaras, los drones sustituyen al ojo humano del inspector durante la inspección visual. Esta función de "ojo remoto" puede realizarse inmediatamente durante el vuelo o puede explorarse en detalle después de descargar los datos recopilados durante su ejecución. Es importante destacar que la inspección visual es el ámbito en el que los drones están siendo adoptados con mayor rapidez. Estas aeronaves se han convertido en herramientas clave para facilitar y optimizar las labores de numerosos profesionales en el área de inspección.

A continuación, en la tabla 4 se describen las ventajas y desventajas de este tipo de inspección teniendo en cuenta las dos formas:

**Tabla 4***Ventajas y Desventajas de la Inspección Visual*

Ventajas	Desventajas
Bajos costos, dependiente de la forma y el proceso que se inspecciona.	Los resultados de una inspección visual dependen del nivel de conocimiento y experiencia de la persona con el objeto de que se inspecciona y, por lo tanto, este método de inspección no destructivo dependerá de la "experiencia" del inspector.
Se puede inspeccionar cualquier material, equipo o herramienta, así como detectar la falla en el lugar exacto.	La inspección directa solo detecta fallas y defectos superficiales.
La inspección remota permite la seguridad de los trabajadores.	No permite identificar la causa de la falla
La inspección remota reduce tiempo en la actividad.	Requiere ocasionalmente del desmonte de equipos o herramientas para la identificación de la falla.

*Nota.* Ventajas y desventajas de la inspección visual. Elaboración propia, 2024.

En resumen, una de las principales ventajas de la inspección es su versatilidad, ya que permite detectar una amplia variedad de anomalías superficiales, como rayones, rugosidad excesiva y áreas no cubiertas por pintura o revestimientos. También facilita la medición precisa y el control dimensional, así como la inspección visual de soldaduras durante la producción, evaluando la calidad del acabado, la forma y las dimensiones. Además, incluye ensayos mecánicos de soportes de tuberías durante su montaje y operación, y la inspección de equipos y componentes, desde intercambiadores de calor

hasta hardware. Asimismo, permite detectar fugas en sistemas de tuberías y uniones  
bridadas, y registrar fenómenos como la corrosión, erosión o daños relacionados con el  
servicio en bombas, válvulas, tuberías y estructuras.

### **Inspección por Líquidos Penetrantes**

La inspección por penetración de líquidos es un método de prueba no destructivo que puede medir las discontinuidades de la superficie en materiales sólidos no porosos. Este método está limitado a discontinuidades abiertas a la superficie. Si el defecto está debajo de la superficie, no puede ser detectado por esta técnica. Este método se basa en que cuando se aplica un líquido sobre una superficie limpia de una pieza, este penetra en las irregularidades formadas en la superficie por efecto capilar, y al limpiar el exceso de líquido de la superficie, se elimina únicamente el líquido introducido. Cuando este líquido se filtra posteriormente, suele marcar la superficie por la acción de un agente llamado revelador (Rosas, 2019).

### **Figura 9**

*Inspección por Líquidos Penetrantes*



*Nota.* Tomado de estado del arte de técnicas no destructivas para inspección de soldadura en tuberías, (2024). <https://www.concrelab.com/liquidos-penetrantes/>

La prueba de penetración de líquidos revela superficies dañadas al penetrar un fondo contrastante con un líquido penetrante. Para tomar este tipo de inspección las superficies deben estar previamente limpiadas, se aplica un líquido penetrante a la superficie y se deja durante un tiempo preestablecido. Los líquidos penetrantes son absorbidos por acción capilar a través de superficies abiertas. A continuación, en la tabla 5 se describen algunas ventajas y desventajas de esta técnica.

**Tabla 5**

*Ventajas y Desventajas de la Inspección por Líquidos Penetrantes*

Ventajas	Desventajas
Sensibilidad alta: La inspección por líquidos penetrantes puede detectar defectos muy pequeños.	Limitaciones en la profundidad: Solo detecta defectos superficiales.
Fácil aplicación: El proceso es relativamente simple y no requiere equipo especializado.	Requiere limpieza: La superficie debe estar limpia y libre de contaminantes.
Bajo costo: Es una técnica económica en comparación con otras técnicas de inspección.	No detecta defectos internos: No puede detectar defectos ocultos.
Versatilidad: Se puede utilizar en diversas superficies y materiales.	Sensibilidad a la preparación: La preparación de la superficie y el líquido penetrante es crucial.
Rápida evaluación: Los resultados se pueden obtener rápidamente.	Interferencia de la rugosidad: La rugosidad de la superficie puede afectar la precisión.
No destructiva: No daña la superficie o el material inspeccionado.	Requiere experiencia: El operador debe tener experiencia para interpretar los resultados.

*Nota.* Ventajas y desventajas. Elaboración propia, (2024).

## Inspección Magnética

La tecnología de inspección de partículas magnéticas es un método para detectar defectos superficiales o subterráneos basados en la acumulación de partículas magnéticas debidas a campos magnéticos errantes en las que se producen estas discontinuidades en el material premagnetizado. Por esta razón, solo se pueden estudiar materiales con alta permeabilidad magnética (ferromagnetismo), generalmente aceros, pero no aluminio, cobre, zinc y aceros inoxidables austeníticos (Rosas, 2019).

Esta técnica consiste en exponer la pieza de trabajo a una magnetización adecuada. El principio físico de la inspección de partículas magnéticas es el magnetismo por imanes, y los imanes tienen la propiedad de retener el campo magnético aplicado durante mucho tiempo, incluso después de detenerlo (De Verger, 2017).

### Figura 10

#### *Inspección Magnética*



*Nota.* Tomado de estado del arte de técnicas no destructivas para inspección de soldadura en tuberías, (2024). <https://hightech-ndt.com/capacitacion/particulas-magneticas-mt/>

Un campo magnético se manifiesta como una fuerza ejercida sobre una carga en movimiento o polos magnéticos dentro de ella. La fuerza ejercida por un campo magnético se denomina inducción magnética o densidad de flujo magnético. Las líneas de fuerza de un campo magnético son las trayectorias de todos los puntos con la misma inducción magnética. Estas líneas son continuas y cerradas, comenzando en el Polo Norte y terminando en el Polo Sur, nunca se cruzan y disminuyen en densidad a medida que aumenta la distancia entre los polos (Rosas, 2019).

La inspección por partículas magnéticas se utiliza para identificar discontinuidades o defectos superficiales y subterráneos en materiales ferromagnéticos. Esto se debe a que los rayones presentes en la parte magnetizada provocan el campo magnético. Cuando se aplican partículas magnéticas a esta superficie, el flujo de fuga atraparé las partículas magnéticas en la ubicación de la falla y se puede mostrar visualmente (Carballini y Viana, 2015).

Cuando se aplica correctamente, la inspección por partículas magnéticas puede proporcionar, entre las siguientes ventajas y desventajas como se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6***Ventajas y Desventajas de la Inspección Magnética*

Ventajas	Desventajas
Capacidad para detectar defectos en materiales ferromagnéticos sin necesidad de desmontar equipos.	Requiere una calibración precisa para evitar falsos positivos.
Alta sensibilidad para detectar cambios en la permeabilidad magnética.	Puede ser afectada por la presencia de materiales ferromagnéticos cercanos.
Puede ser utilizada para inspeccionar tuberías y equipos en operación.	No es efectiva para detectar defectos en materiales no ferromagnéticos.
No requiere la aplicación de líquidos o productos químicos.	Requiere experiencia: El operador debe tener experiencia para interpretar los resultados.
Puede ser integrada con otras técnicas de inspección para mejorar la precisión.	Puede ser difícil distinguir entre defectos y variaciones naturales en la permeabilidad magnética.

*Nota.* Ventajas y desventajas de la inspección magnética. Elaboración propia, (2024).

Para poder realizar inspecciones por partículas magnéticas es necesaria la presencia de magnetismo en la pieza que se va a examinar, aplicar el medio o las partículas para la inspección e interpretar los patrones que forman las partículas cuando se ven atraídas por las fugas de campo magnético causadas por discontinuidades de la pieza.

**Inspección por Ultrasonido**

El ultrasonido se basa en los siguientes principios: Una onda ultrasónica se transmite a la pieza de trabajo y se propaga hasta que se refleja. El ultrasonido reflejado

regresa al receptor, brindándole información sobre su trayectoria. La información proporcionada se basa en la cantidad de energía reflejada por el ultrasonido y la distancia recorrida por el ultrasonido. Las ondas de sonido se propagan a través de los materiales, pero tienden a perder energía y se reflejan en las interfaces. El eco reflejado se muestra y analiza para identificar la presencia y ubicación de defectos y discontinuidades. El ultrasonido es generalmente una vibración mecánica o una onda de presión similar al sonido audible (Rosas, 2019).

### **Figura 11**

#### *Inspección con Ultrasonido*



*Nota.* Tomado de estado del arte de técnicas no destructivas para inspección de soldadura en tuberías, (2024). [https://www.freepik.es/fotos-premium/inspeccion-trabajador-masculino-medicion-espesor-tuberia-petroleo-gas-industria-petroleo-gas-tuberia-registro-verificacion\\_20158279.htm](https://www.freepik.es/fotos-premium/inspeccion-trabajador-masculino-medicion-espesor-tuberia-petroleo-gas-industria-petroleo-gas-tuberia-registro-verificacion_20158279.htm)

La única diferencia es que el incremento o frecuencia de vibración es mucho mayor. El sonido audible cubre el rango de 30 Hz a 15 KHz. Las vibraciones superiores a 15 kHz

se denominan comúnmente ultrasonidos, pero para las pruebas no destructivas, el rango suele ser de 1 MHz a 30 MHz o más (Rosas, 2019).

Las pruebas ultrasónicas son el método más utilizado para probar compuestos y materiales. Para materiales compuestos se usa un rango de frecuencia de 20 KHz a 20 Mhz. Para la homogeneización, el área de prueba se reduce significativamente debido al aumento de la atenuación, la frecuencia de funcionamiento está limitada a 5 MHz o menos, lo que reduce la detección de defectos menores (Fernando y Danilo, 2023).

En la tabla 7 se describen las siguientes ventajas y desventajas de esta técnica:

**Tabla 7**

*Ventajas y Desventajas de la Inspección por Ultrasonido*

Ventajas	Desventajas
Técnica sensible, puede cubrir áreas muy grandes en una sola prueba	Esta limitado a cálculos matemáticos y geométricos
Se puede aplicar a diferentes equipos y materiales	La lectura de la prueba la realizan profesionales altamente calificados
Los ultrasonidos no requieren de elementos desechables	La toma de datos puede ser errónea en áreas corrugadas e irregulares
Proporciona datos instantáneos	Se debe realizar con equipos electrónicos determinados.
Los equipos son fáciles de transportar llegando a cualquier lugar donde se encuentre el equipo a inspeccionar	Dificulta la toma de datos en superficies cercanas

*Nota.* Ventajas y desventajas de la inspección ultrasonido. Elaboración propia, (2024).

En varias de las instalaciones industriales y petroleras, los instrumentos de inspección por ultrasonido son usadas principalmente para beneficiar la seguridad, protección ambiental, conservación de seguridad y aseguramiento industrial para los equipos y trabajadores.

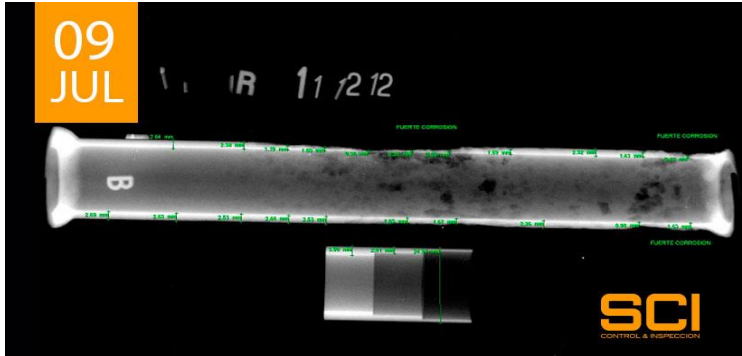
### **Radiografía**

Término genérico para métodos de ensayo basados en la absorción diferencial de radiación o radiación electromagnética de longitud de onda muy corta sobre una parte específica de la pieza de trabajo que se va a inspeccionar. Diferentes partes de la pieza de trabajo absorben diferentes cantidades de radiación penetrante debido a las diferencias en densidad, variaciones en el grosor de la pieza o diferencias en las propiedades de absorción debido a la densidad. Estas variaciones en la absorción de la radiación penetrante pueden controlarse detectando la radiación penetrante. La norma ASTM E94 guía el uso de la tecnología de rayos X (Rosas, 2019).

Así mismo, Vahdati (2020) plantea que cuando se instala el aislamiento, se pueden usar técnicas radiográficas o de rayos X para detectar cambios en el espesor de la pared de la tubería que transporta petróleo debido a la corrosión. Las secciones de la pared de la tubería sospechosas de corrosión pueden estar expuestas a radiación gamma de iridio-192 o cobalto-60, y la radiación transmitida a través de la tubería es detectada por una película sensible. La película sensible registra una imagen de la sección de la tubería, que se puede utilizar para calcular el espesor de pared restante de la tubería.

## Figura 12.

### *Inspección con Radiografía*



*Nota.* Tomado de external corrosion detection of oil pipelines using fiber optics, (2024).

<https://scimexicosa.mx/radiografia-industrial-digital/>

Esta técnica, aunque convencional y muy utilizada por las industrias petroleras presenta desventajas principalmente por los trabajadores que son expuestos a esta técnica del uso de los rayos X, debido a los riesgos de radiación.

La radiografía industrial utiliza haces de iones para realizar pruebas no destructivas de estructuras. El principio básico es que cada parte de la muestra tiene diferentes propiedades de absorción de la radiación, formando así una imagen a través del haz transmitido (Sossa, 2021).

En este tipo de inspección se identifican las ventajas y desventajas, como se muestra en la tabla 8:

**Tabla 8***Ventajas y Desventajas de la Inspección Radiográfica*

Ventajas	Desventajas
Registros permanentes con rayos-x, se puede ajustar a varios niveles de energía.	Llega a ciertas partes del material según el espesor de la parte del equipo o tubería a atravesar
Detecta defectos superficiales e internos	Las fallas transversales son difíciles de detectar
Sensibilidad a los cambios de espesor, corrosión, huecos, grietas, material y cambios de densidad.	Peligro de radiación y altos costos por su licencia
No requiere de preparación de la superficie antes de la prueba	Requiere de personal entrenado para su manejo y análisis de resultados
No está limitado por el tipo de material o densidades	Orientación del equipo y falla puede ser crítica.
Con rayos gama se obtiene altas energías de radiación	
Permite la reconstrucción 3D del equipo o material que está evaluando	
Permite inspeccionar componentes ensamblados	

*Nota.* Ventajas y desventajas de la inspección radiográfica. Elaboración propia, (2024).

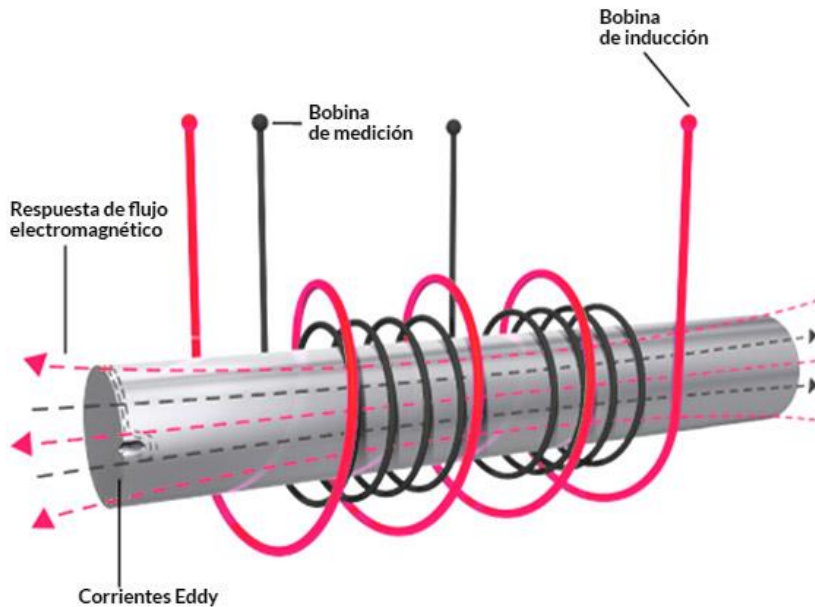
Este tipo de inspección permite identificar de manera confiable defectos tanto internos como superficiales. La inspección regular de componentes críticos, que están expuestos a sustancias corrosivas o tensiones extremas, es esencial para prevenir fallos en uniones soldadas. Mediante el uso de imágenes digitales y tecnología de radiografía, se pueden detectar defectos que no son visibles a simple vista. Aunque estos defectos suelen

estar ocultos por el ruido inherente a los compuestos añadidos, la técnica de radiografía es eficaz. Sin embargo, requiere de equipos robustos, lo que la hace poco práctica para inspeccionar segmentos largos.

Gracias a la innovación tecnológica, la reconstrucción tridimensional ha emergido como una solución. Esta técnica permite obtener registros detallados de las áreas inspeccionadas, que pueden ser analizados por varios expertos, y facilita la evaluación de segmentos de gran longitud de manera más eficiente.

### **Corrientes de Eddy**

El principio de medición de corrientes de Eddy es un método de inducción basado en el principio de inducción electromagnética al pasar una corriente a través de una bobina. Una corriente alterna que crea un campo magnético a su alrededor. Las corrientes de Eddy se inducen cuando se coloca un metal conductor en este campo electromagnético. Según la ley de inducción de Faraday, forman un campo electromagnético. Este campo magnético se opone al campo magnético producido por la bobina, que también cambia la impedancia de la bobina. El controlador calcula la impedancia considerando los cambios de amplitud y fase con la posición de la bobina del sensor. Esta técnica se utiliza para identificar varios estados físicos, estructurales y metalúrgicos de metales y piezas metálicas ferromagnéticas y no ferromagnéticas (Rosas, 2019).

**Figura 13***Corrientes de Eddy*

*Nota.* Tomado de External corrosion detection of oil pipelines using fiber optics, (2024).

<https://images.app.goo.gl/NLrvZfmRYKfz9r7FA>

La corriente de Eddy como técnica de inspección, permite detectar la corrosión debajo del aislamiento. El campo magnético producido por la bobina crea corrientes de Eddy en la pared de la tubería. El campo magnético inducido por una bobina se produce aplicando y controlando una corriente eléctrica a la bobina. Cuanto más gruesa es la pared del tubo, más tardan las corrientes de Foucault en decaer hasta cero. Esta característica y técnica se utiliza para determinar el espesor de pared restante de la tubería (Vahdati et al., 2020). A continuación, en la tabla 9 se presentan algunas ventajas y desventajas de esta técnica.

**Tabla 9***Ventajas y Desventajas de Corrientes de Eddy*

Ventajas	Desventajas
Detección precisa de corrosión y erosión en tuberías y equipos, incluso en áreas de difícil acceso.	Limitaciones en la detección de defectos en tuberías de diámetro muy grande o pequeño.
Capacidad para detectar grietas y desgaste en superficies internas y externas.	Requiere equipamiento especializado y costoso para inspeccionar tuberías y equipos complejos.
No requiere el uso de líquidos penetrantes ni radiación ionizante, reduciendo el riesgo de contaminación.	La interpretación de los resultados puede ser compleja y requerir experiencia en la técnica.
Puede inspeccionar tuberías y equipos en servicio, sin interrumpir el proceso.	Puede ser afectada por la presencia de campos magnéticos externos o interferencias eléctricas.
Ofrece resultados rápidos y precisos para tomar decisiones informadas sobre mantenimiento y reparación.	Requiere calibración precisa para evitar falsos positivos y negativos.
Reduce el riesgo de accidentes y daños ambientales debido a la detección temprana de defectos.	No es efectiva para detectar defectos en tuberías con recubrimientos o revestimientos gruesos.

*Nota.* Elaboración propia, (2024).

**Inspecciones Basadas Riesgos (RBI)**

Por último, se da a conocer la técnica de Inspecciones Basadas en Riesgos (RBI) que es una herramienta efectiva para minimizar el riesgo de fallas y accidentes en instalaciones industriales. Esta técnica se enfoca en identificar y priorizar los activos y

componentes críticos de una instalación, considerando factores como la probabilidad de falla, la consecuencia de la falla y la criticidad del componente en el proceso. La técnica RBI se basa en la evaluación del riesgo asociado a cada componente o activo. Esto se logra mediante la identificación de riesgos potenciales, la evaluación de la probabilidad de falla y la consecuencia de la falla. Posteriormente, se priorizan los componentes o activos según su nivel de riesgo, lo que permite planificar las inspecciones y mantenimientos de manera efectiva (Gómez y de la Torre, 2018).

El proceso RBI implica la recopilación de datos sobre los componentes y activos, incluyendo información sobre su diseño, operación y mantenimiento. Luego, se realiza un análisis de riesgos para identificar los riesgos potenciales asociados a cada componente o activo. A continuación, se evalúa la probabilidad de falla y la consecuencia de la falla de cada componente o activo. La priorización de los componentes o activos se realiza mediante la utilización de matrices de riesgo, que permiten evaluar el nivel de riesgo asociado a cada componente. Posteriormente, se planifican las inspecciones y mantenimientos según la priorización, asegurando que los componentes más críticos reciban la atención necesaria.

La implementación de la técnica RBI requiere la utilización de herramientas y técnicas específicas, como el análisis de árbol de fallas y el análisis de consecuencias. Además, se utiliza software de gestión de mantenimiento para planificar y programar las inspecciones y mantenimientos. En resumen, la técnica RBI es una herramienta efectiva para minimizar el riesgo de fallas y accidentes en instalaciones industriales, al priorizar las inspecciones y mantenimientos en los componentes más críticos. Su implementación

requiere una evaluación exhaustiva de los riesgos asociados a cada componente y la utilización de herramientas y técnicas específicas (Arduiz, 2023).

Entre las principales ventajas y desventajas, según Paredes (2020) se muestran en la tabla 10:

**Tabla 10**

*Ventajas y Desventajas de la Técnica de Inspección Basada en Riesgos (RBI)*

Ventajas	Desventajas
Permite identificar y priorizar componentes críticos	Requiere una evaluación exhaustiva de riesgos inicial
Reduce la frecuencia de inspecciones innecesarias	Puede ser difícil establecer criterios de priorización
Mejora la detección de fallas potenciales	La actualización de la evaluación de riesgos puede ser compleja
Optimiza la planificación de mantenimiento	Requiere datos precisos sobre la historia de mantenimiento
Reduce el riesgo de accidentes y daños ambientales	Puede ser sensible a cambios en la legislación y regulaciones

*Nota.* Inspección basada en riesgos. Elaboración propia, (2024).

Por último, en la tabla 11 se presenta una síntesis de las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas de inspección descritas anteriormente.

**Tabla 11***Ventajas y desventajas de las técnicas de Inspección*

Técnica/Equipo	Ventajas	Desventajas
Inspección visual	Baja costo, fácil de implementar, no requiere equipo especializado (Serrani, 2023).	Requiere acceso visual directo, puede ser subjetiva, no detecta defectos internos
Inspección por líquidos penetrantes	Puede acceder a áreas inaccesibles, alta precisión, puede detectar defectos internos	Requiere equipo especializado, puede ser costoso, requiere personal calificado
Inspección magnética	Puede detectar defectos internos y externos en materiales ferromagnéticos Alta precisión en la detección de grietas y desgaste No requiere contacto físico con la superficie Puede inspeccionar componentes complejos	Solo es efectiva en materiales ferromagnéticos Requiere equipo especializado y calibración precisa Puede ser afectada por campos magnéticos externos Requiere personal calificado para interpretar resultados
Ultrasonido	No destructiva, alta precisión, puede detectar defectos internos	Requiere equipo especializado, puede ser lenta, requiere personal calificado
Radiografía industrial	Puede detectar defectos internos, alta precisión, puede detectar defectos en materiales densos	Requiere equipo especializado, puede ser peligrosa, requiere personal calificado

Corrientes de Eddy	Puede detectar defectos internos y externos en materiales conductores Alta precisión en la detección de grietas y desgaste No requiere contacto físico con la superficie Puede inspeccionar componentes en servicio	Requiere equipo especializado y calibración precisa Puede ser afectada por interferencias eléctricas No es efectiva en materiales no conductores Requiere personal calificado para interpretar resultados
Inspección basada en riesgos	Rápido, seguro, puede acceder a áreas inaccesibles, puede detectar defectos en superficies grandes	Requiere equipo especializado, puede ser costoso, requiere personal calificado

*Nota.* Técnicas de inspección. Elaboración propia, (2024).

### ***Importancia de las Nuevas Tecnologías de Inspección en la Industria del Petróleo***

La ciencia y la tecnología han transformado significativamente la industria petrolera a lo largo de los años. Los avances tecnológicos recientes han provocado cambios importantes en áreas como la exploración, desarrollo, producción e inspección. Estos avances han optimizado los procesos, haciéndolos más eficientes, seguros y sostenibles desde el punto de vista ambiental. Por ello, es fundamental conocer las innovaciones en el campo de la inspección en la industria, donde el uso de sensores, drones, robots y otras tecnologías emergentes juega un papel clave.

En los últimos años, la tecnología de sensores inalámbricos ha experimentado un significativo avance, permitiendo la creación de redes industriales de sensores inalámbricos (IWSN) más eficientes y confiables. Estas redes están diseñadas para satisfacer las necesidades específicas de la producción industrial, incluyendo la monitorización remota de parámetros críticos, la detección de anomalías y la optimización de procesos.

Las IWSN se caracterizan por su conectividad inalámbrica, que permite la comunicación entre sensores y sistemas de control sin la necesidad de cables. Esto facilita la monitorización remota de parámetros críticos, como temperatura, presión y flujo, lo que a su vez permite la detección temprana de anomalías y la prevención de accidentes. Además, las IWSN pueden ajustar los parámetros de funcionamiento para maximizar la eficiencia y reducir costos.

La implementación de IWSN en la industria petrolera ofrece numerosos beneficios, incluyendo la mejora de la eficiencia, el aumento de la seguridad y la reducción de la huella ambiental. Por ejemplo, las IWSN pueden monitorear el estado de las tuberías y detectar fugas o corrosión, lo que puede prevenir accidentes y reducir la pérdida de recursos. Además, las IWSN pueden supervisar la condición de los equipos críticos, como bombas y motores, lo que puede prolongar su vida útil y reducir los costos de mantenimiento.

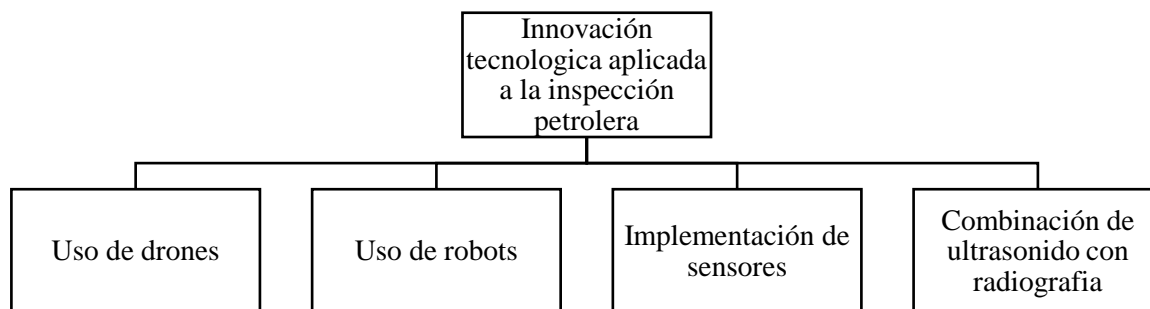
Sin embargo, la implementación de IWSN también presenta desafíos, como la seguridad cibernética y la interoperabilidad. Es fundamental proteger los datos transmitidos por las IWSN y prevenir ataques cibernéticos. Además, es necesario desarrollar estándares para las IWSN para garantizar su compatibilidad con sistemas existentes. A pesar de estos desafíos, la investigación y desarrollo continuo en la tecnología de sensores inalámbricos y

las IWSN están transformando la industria petrolera, ofreciendo beneficios significativos en términos de eficiencia, seguridad y calidad.

La industria petrolera está experimentando una transformación digital, impulsada por la adopción de tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube. Las IWSN son una parte fundamental de esta transformación, permitiendo la creación de sistemas más eficientes, seguros y sostenibles. En el futuro, es probable que veamos una mayor adopción de las IWSN en la industria petrolera, lo que conducirá a una mayor eficiencia y productividad (Dender, 2018). Como se muestra a continuación, en la figura 14 se dan a conocer la innovación tecnología en la industria petrolera y los equipos usados.

#### **Figura 14**

##### *Innovación Tecnológica en la Industria Petrolera*



*Nota.* Innovación en industria petrolera. Elaboración propia, (2024).

## Drones

Como lo describe Alharam (2020); los sistemas desatendidos se utilizan ampliamente en muchas aplicaciones. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), también conocidos como drones, se consideran muy poderosos. Los drones tienen una variedad de usos que son útiles en diferentes campos.

Los drones son cada vez más autónomos en términos de servicio y usabilidad. Originalmente un fenómeno de aficionados para los consumidores, los drones se han convertido recientemente en el campo de la inspección y detección visual remota de instalaciones industriales y otros casos de uso comercial. La inspección con drones es un método de inspección innovador. La demanda de los clientes está creciendo rápidamente y las oportunidades se expanden cada día. La demanda de aplicaciones militares ha crecido significativamente, así mismo, las aplicaciones comerciales se están poniendo al día (Mattar et al., 2018).

### Figura 15

#### *Inspección con Drones*



*Nota:* Tomado de desarrollo de un dron de pared para ensayos ultrasónicos y de corrosión no destructivos, (2024). <https://inspenet.com/articulo/el-valor-del-gas-en-la-industria-petrolera/>

La inspección de drones sin contacto, como detectores visuales, ópticos, IR, LIDAR y de gas, se está convirtiendo rápidamente en un negocio de gran volumen, pero aún se necesitan esfuerzos significativos en robótica aeronáutica y mediciones de prueba sin contacto (NDT).

Los drones se utilizan para fotografía aérea, vigilancia, transporte y entrega, fines militares y muchos otros usos. La mayoría de los drones tienen dos sistemas de vuelo. El primero, permite que vuelen de forma totalmente autónoma sin intervención humana. Esto se puede lograr configurando un plan de vuelo y vinculándolo al ordenador del dron antes del vuelo. En el segundo, el piloto se aloja en una especie de quirófano, donde tiene el control total del dron (Alharam et al., 2020).

Los drones generalmente requieren un GPS de alta precisión para determinar su ubicación exacta. Además, los drones difieren en diseño y especificaciones. Según el uso específico, los ingenieros pueden decidir qué tipo de dron necesitan para cumplir con los requisitos de su misión. Hay muchos detectores, sensores, cámaras, etc. (Alharam et al., 2020).

En cuanto a esta tecnología, se reconoce la evolución en la inspección visual, dado que este medio permite tener una visión más exacta de los equipos e instalaciones inspeccionadas, además de la implementación de cámaras, se conserva la oportunidad de complementarse con sensores que identificarían otro tipo de fallas, razón por la que este avance es opción viable y eficiente para el caso de las industrias petroleras.

## **Robots**

Dado que muchos activos de petróleo están ubicados en el ambiente extremo, existe una demanda constante de robots para realizar tareas de inspección, que son más rentables y seguras.

Robots como operados a distancia (ROV), Subacuáticos autónomos (AUV), vehículos terrestres no tripulados (UGV) y Vehículos aéreos no tripulados (UAV); tienen diferentes mecanismos y estructuras para diferentes tareas de inspección. Algunos de ellos están enfocados en inspeccionar tanques de almacenamiento de aceite, mientras que otros están diseñados para inspección de tuberías. Sin embargo, la mayoría de los robots necesitan ingenieros experimentados para manipularlos y llevar a cabo el proceso de inspección. Mayores niveles de flexibilidad del robot y la autonomía pueden hacer que la inspección sea más inteligente y eficiente. Para tener una comprensión integral robot de inspección en la industria del petróleo y el gas, este documento se centra en la revisión de las tecnologías clave en diferentes tipos de robots de inspección, discutiendo los desafíos y destacando las tendencias en futuras investigaciones, que harán el proceso de inspección más eficiente, inteligente y rentable (Yu et al., 2019).

## Figura 16

### *Inspección con Robots*



*Nota.* Tomado de detection and measuring distance of crack and object obstacle in pipeline using inspection robot, (2024). <https://inspenet.com/articulo/el-valor-del-gas-en-la-industria-petrolera/>

Los robots tienen la capacidad de seguir una vista de la estructura. Cuando se encuentran en un entorno de degradación visual, los LED se pueden utilizar para hacer frente a la ausencia de iluminación adecuada (Carballini y Viana, 2018).

En este caso, según los documentos analizados, en cuanto a los robots de inspección se puede decir que los AUV pueden ser más eficientes que los ROV. Los UAV y AUV autónomos serán el foco de investigación en las industrias de petróleo y gas, motivo por el cual se puede desarrollar más su inteligencia para la inspección más precisa y eficiente. En este tipo de inspección se debe tener en cuenta las estrategias de control inteligente y los métodos de planificación de caminos, la localización autónoma y el rendimiento de navegación (Pinzón y Caiza, 2022).

En cuanto a las ventajas que presenta la inspección con robots Jara (2022) describe los beneficios de la robótica como medio para automatizar los procesos de producción y prueba son cuatro (Productividad, flexibilidad, calidad y seguridad laboral), estos identificados en el informe de Robótica y Automatización de la Fundación COTEC para la Innovación Tecnológica (2006).

Desde una perspectiva más técnica, la robótica ofrece las siguientes ventajas para procesos y productos finales (Jara, 2022):

- Se logran tiempos cortos en el ciclo de proceso.
- Los procesos robóticos como medio de automatización tienen un alto grado de autonomía, permiten un mejor control de los procesos y requieren menos mantenimiento.
- La robótica permite una mayor precisión en el trabajo en comparación con otros métodos no automatizados, lo que da como resultado una mayor calidad y fiabilidad del producto.
- Las interfaces y las buenas técnicas de programación permiten una programación más rápida y reducen el tiempo necesario para cambiar de tarea (Jara, 2022).

En la tabla 12 se indican algunos ejemplos de robots utilizados para tareas de inspección en la industria petrolera:

**Tabla 12***Tipos de Robots usados para la Inspección Petrolera*


---

NAUTILUS	Plataforma robótica de inspección, desarrollada para los ensayos no destructivos (NDT) en los tanques de almacenamiento utilizados en la industria petroquímica (Jara, 2022).
HUNTER	Es un rastreador de acceso remoto modular diseñado para imágenes ultrasónicas NDT de bajo costo de estructuras ferromagnéticas como tanques de almacenamiento, recipientes a presión, tuberías de gran diámetro y cascos de barcos sin necesidad de acceso por cuerda. Esto elimina los riesgos potenciales asociados con la inspección manual, especialmente en terrenos peligrosos o inaccesibles (Jara, 2022).
NEPTUNE	Es un rastreador magnético resistente y avanzado diseñado para obtener imágenes rentables de escaneo A, B, C y Sector en estructuras ferromagnéticas bajo el agua, como recipientes a presión e instalaciones en alta mar sin la necesidad de costosos buzos o ROV bajo el agua (Jara, 2022).
VORTEXSCANNER	Es un rastreador ligero adherido al vacío, diseñado para la inspección NDT rentable de una variedad de grandes superficies no magnéticas en entornos peligrosos y de difícil acceso (Jara, 2022).
El robot EOLOS	Equipado con una cámara de alta definición que ejecuta el servicio de inspección, toma imágenes de alta calidad con gran

---

---

detalle, proporcionando una imagen detallada del perfecto estado de la hoja y de los daños encontrados (Jara, 2022).

---

*Nota.* Tipos de robots. Elaboración propia, (2024).

Para la implementación de robots en las labores de inspección, es fundamental que estos cuenten con un alto rendimiento, especialmente en términos de velocidad y precisión de movimiento. La calidad de su desempeño puede mejorarse mediante el uso de materiales más ligeros, sistemas de transmisión sin juego ni inercia, actuadores rápidos y precisos, así como sensores de alta resolución.

### **Sensores**

Las inspecciones de la industria y el envejecimiento de las redes de tuberías han aumentado la necesidad de desarrollar sensores de detección de corrosión para tuberías de petróleo y gas. El hecho de que la mayoría de los oleoductos y gasoductos sean imposibles o muy difíciles de sobrevolar también ha influido en la demanda del desarrollo de sensores de detección de corrosión que puedan instalarse permanentemente en el campo (Vahdati, et al., 2020). Con este método, una red de sensores NDT instalados se utilizan para detectar corrosiones y grietas. Sin embargo, en entornos peligrosos, es difícil o costoso alcanzar y desplegar dichas redes (Yu et al., 2019).

El sensor consta de una pequeña superficie piezoeléctrica y mide la impedancia dinámica. Un solo transductor puede actuar como sensor y actuador. Sin embargo, este método es difícil de aplicar en ambientes de alta temperatura.

Por otra parte, el radar de penetración terrestre utiliza una antena móvil para transmitir ondas electromagnéticas a un objetivo. La información filtrada es fiable y muy completa. Sin embargo, este método es costoso y requiere operadores experimentados (Aljuaid et al., 2020).

### **Figura 17**

#### *Inspección con Sensores*



*Nota.* Tomado de Desarrollo de algoritmo de control de velocidad para el Medidor Instrumentado de Inspección de Oleoductos (IPIG) en oleoductos líquidos de alta velocidad, (2024). <https://rdamasco.com.br/solucao/ultrassom-de-maquinas-340/>

Este tipo de inspección presenta tanto ventajas como desventajas, dejando de lado el costo, es inevitable pensar que los sensores puedan servir para inspección en lugares riesgosos, ya que en lugares peligrosos su instalación es de difícil para los trabajadores; por

otro lado, como se mencionaba anteriormente este sistema sirve como complemento para la inspección con drones, ya que juntos hacen una inspección segura, eficiente y rápida.

### **Ultrasonido Contra Radiografía**

La tecnología de ultrasonido con matriz en fase es un método de inspección computarizada de última generación que permite registrar y detectar anomalías con alta precisión. Su principio físico de funcionamiento es similar al ultrasonido de pulso-eco convencional, pero con la ventaja de que parámetros como el ángulo de refracción, el punto de salida del haz y el enfoque en áreas específicas pueden controlarse mediante software. A medida que el uso de materiales radiactivos se vuelve más restrictivo debido a las dificultades para su importación, exportación, manejo y legalización, se han ido sustituyendo por tecnologías como los rayos X y gamma. Aunque estas últimas no requieren una zona de exclusión, su uso puede generar grandes pérdidas económicas, retrasos en la producción y paradas en la fábrica para retirar las placas de rayos X, que además son dañinas. En cambio, el ultrasonido con matriz en fase tiene una mayor probabilidad de detección, no genera residuos radiactivos y permite realizar inspecciones de manera oportuna y segura (Rosas, 2019).

**Figura 18***Inspección Ultrasonido Contra Radiografía*

*Nota.* Tomado de Desarrollo de un dron de pared para ensayos ultrasónicos y de corrosión no destructivos, (2024). <https://www.youtube.com/watch?v=85uff73zYJw>

Este tipo de inspección tiene una gran ventaja, aparte de prestar los servicios de manera eficiente, es amigable con el medio ambiente, dado que no perjudica ni el suelo, flora o fauna. Siendo así, cada una de estas tecnologías innovadoras para la inspección en la industria petrolera resaltan el desarrollo en el sector y se han vuelto un punto indispensable para los retos que se presentan actualmente en la industria petrolera.

**Análisis Comparativo Entre las Técnicas de Inspección de la Industria Petrolera**

En la tabla 13 que se presenta a continuación, se resume los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica sobre los métodos de inspección y las tendencias innovadoras en la industria petrolera. La tabla refleja la frecuencia de uso de diversas técnicas de inspección

en la literatura consultada, ofreciendo una visión general de las tendencias y enfoques actuales en el campo de la inspección de infraestructuras petroleras.

**Tabla 13**

*Frecuencia de Uso de las Técnicas de Inspección en la Revisión Documental*

Método de inspección	Número de veces utilizado	Porcentaje
Inspección visual	50	33.3%
Inspección por líquidos penetrantes	50	33.3%
Inspección magnética	50	33.3%
Ultrasonido	30	20%
Radiografía industrial	20	13.3%
Corrientes de Eddy	10	6.7%
Inspección basada en riesgos (RBI)	10	6.7%
Inspección con drones	25	16.7%
Inspección con robots	15	10%
Inteligencia artificial	10	6.7%
Realidad virtual y aumentada	5	3.3%
Análisis de datos y minería de datos	5	3.3%
Monitoreo en tiempo real con sensores IoT	5	3.3%
Otros métodos	10	6.7%

*Nota.* Frecuencia de uso técnicas de inspección. Elaboración propia, 2024

En conclusión, la tabla ofrece una visión integral de las tendencias y enfoques actuales en el ámbito de la inspección en la industria petrolera. Los resultados revelan que la inspección visual sigue siendo el método más empleado, seguida del ultrasonido y el uso de drones. Esto evidencia que la industria está incorporando tecnologías innovadoras con el fin de mejorar tanto la eficiencia como la seguridad en la inspección de instalaciones y equipos.

Por otra parte, también se observa que la inteligencia artificial y la realidad virtual y aumentada son métodos que, aunque menos utilizados, han empezado a cobrar mayor fuerza en los últimos años, lo que sugiere que hay un potencial para la adopción de estas tecnologías en el futuro.

En general, los resultados de esta consulta bibliográfica destacan la corrosión y degradación de materiales como un tema importante en la industria petrolera, siendo necesario desarrollar métodos de inspección más efectivos para detectar y prevenir estos problemas. La importancia de la innovación y la adopción de tecnologías avanzadas en la inspección petrolera, con el objetivo de mejorar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad en la industria.

En general, los resultados de esta revisión bibliográfica subrayan la corrosión y la degradación de materiales como un desafío crucial en la industria petrolera, lo que resalta la necesidad de desarrollar métodos de inspección más eficaces para detectar y prevenir estos problemas. Además, se destaca la importancia de la innovación y la incorporación de tecnologías avanzadas en las inspecciones, con el fin de mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en el sector.

A continuación, se relacionan cuadros comparativos entre las diferentes técnicas convencionales e innovadoras donde se analizan las técnicas/equipos, ventajas, desventajas, tipos de defectos que inspeccionan, la precisión, el costo, tiempo de implementación, entre otros aspectos relevantes para el análisis.

**Tabla 14**

*Cuadro Comparativo sobre los Tipos de Defectos y la Eficiencia de las Técnicas*

Técnica/Equipo	Tipos de defectos	Tipo de material	Superficie de exploración	Evaluación en zonas de difícil acceso
Inspección visual	Corrosión, grietas, desgaste	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Alta	Limitada
Inspección por líquidos penetrantes	Grietas, porosidad, corrosión	Metálicos, metálicos (cerámicos, plásticos, etc.)	Baja-Media	Limitada
Inspección magnética	Grietas, corrosión, desgaste en materiales ferromagnéticos	Ferromagnéticos (acero, hierro, etc.)	Media-Alta	Media
Ultrasonido	Defectos internos, grietas, corrosión	Metálicos, metálicos (plásticos, cerámicos, etc.)	Media	Limitada
Radiografía	Defectos internos, grietas, corrosión	Metálicos, densos (acero, titanio, etc.)	Media	No recomendada
Corrientes de Eddy	Grietas, corrosión, desgaste en materiales conductores	Conductores (aluminio, cobre, etc.)	Media-Alta	Media

Inspección en riesgos (RBI)	basada	Todos (grietas, corrosión, desgaste, etc.)	Todos (metálicos, no metálicos, etc.)	Alta	Alta
Inspección con drones	con	Corrosión, grietas, desgaste	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Alta	Alta
Inspección con robots	con	Defectos internos, grietas, corrosión	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Alta	Alta
Técnicas de inspección en IA	de	Defectos internos, grietas, corrosión	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Alta	Alta
Monitoreo en tiempo real con sensores IoT	en tiempo real con	Cambios en la temperatura, presión, vibraciones, etc.	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Alta	Alta
Análisis de datos en tiempo real con IoT	en tiempo real con IoT	Cambios en el comportamiento de los equipos, puede predecir fallos	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Alta	Alta
Inspección con realidad aumentada (RA)	con	Defectos en la superficie, puede proporcionar información adicional sobre el equipo	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Media	Limitada
Inspección con realidad virtual (RV)	con	Defectos en la superficie, puede proporcionar información adicional sobre el equipo	metálicos, no metálicos, transparentes, opacos	Media	Limitada

*Nota.* Fuente elaboración propia con base en la revisión de artículos, 2024.

La tabla presenta una comparativa de diferentes técnicas de inspección utilizadas en la industria petrolera, evaluando su capacidad para detectar defectos y su efectividad en zonas de difícil acceso. Las técnicas más efectivas para la inspección en zonas de difícil acceso son la inspección con drones y robots, así como las técnicas de inspección basadas en inteligencia artificial (IA) y monitoreo en tiempo real con sensores IoT. Estas técnicas ofrecen una alta precisión en la detección de defectos y pueden acceder a áreas inaccesibles para los humanos.

Por otro lado, la radiografía industrial y la inspección visual presentan limitaciones en zonas de difícil acceso, mientras que el ultrasonido tiene una efectividad media. En cuanto a la superficie de exploración, la inspección con drones y robots, así como las técnicas de inspección basadas en IA y monitoreo en tiempo real con sensores IoT, ofrecen una alta capacidad de exploración.

La inspección con realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV) presentan una efectividad media en la superficie de exploración y limitaciones en zonas de difícil acceso. En general, la elección de la técnica de inspección adecuada dependerá del tipo de defecto a detectar, el material a inspeccionar y la accesibilidad de la zona.

**Tabla 15**

*Cuadro Comparativo sobre la Complejidad de cada Técnica de Inspección*

Técnica/Equipo	Nivel de experticia del profesional	Acceso a la información de la técnica	Precisión	Complejidad
Inspección visual	Bajo-Moderado	Fácil	Media	Baja

Inspección por líquidos penetrantes	Moderado	Fácil-Moderado	Media-Alta	Media
Inspección magnética	Moderado-Alto	Moderado	Alta	Media-Alta
Ultrasonido	Moderado-Alto	Moderado	Media-Alta	Media
Radiografía industrial	Alto	Limitado	Alta	Alta
Radiografía	Moderado-Alto	Moderado	Alta	Media-Alta
Corrientes de Eddy	Alto	Limitado-Moderado	Alta	Alta
Inspección con drones	Moderado-Alto	Fácil-Moderado	Alta	Media-Alta
Inspección con robots	Alto	Limitado-Moderado	Alta	Alta
Técnicas de inspección basadas en IA	Alto	Limitado	Alta	Alta
Monitoreo en tiempo real con sensores IoT	Moderado-Alto	Fácil-Moderado	Alta	Media-Alta
Análisis de datos en tiempo real con IoT	Alto	Limitado	Alta	Alta
Inspección con realidad aumentada (RA)	Moderado-Alto	Fácil-Moderado	Media-Alta	Media-Alta
Inspección con realidad virtual (RV)	Alto	Limitado	Alta	Alta

*Nota.* Bajo: Requiere poca experiencia y conocimiento. - Moderado: Requiere experiencia y conocimiento medios. Alto: Requiere mucha experiencia y conocimiento. - Fácil: La información está fácilmente disponible. - Limitado: La información está restringida o difícil de acceder. Media: La precisión o complejidad es moderada. Alta: La precisión o complejidad es alta. Fuente elaboración propia con base en la revisión de artículos, 2024.

El análisis de la información revela que las técnicas de inspección más avanzadas y precisas, como la radiografía industrial, inspección con robots, técnicas de inspección basadas en IA, análisis de datos en tiempo real con IoT e inspección con realidad virtual (RV), requieren mayor experiencia y conocimiento de los profesionales. Además, la información sobre estas técnicas puede ser restringida o difícil de acceder.

Por otro lado, las técnicas más simples y accesibles, como la inspección visual y ultrasonido, requieren menor experiencia y conocimiento, y su información está fácilmente disponible. Sin embargo, estas técnicas pueden tener menor precisión y complejidad. La precisión es un factor clave en la elección de la técnica adecuada. Las técnicas más precisas son la radiografía industrial, inspección con drones, inspección con robots, técnicas de inspección basadas en IA, monitoreo en tiempo real con sensores IoT y análisis de datos en tiempo real con IoT.

La complejidad también es un factor importante. Las técnicas más complejas son la radiografía industrial, inspección con robots, técnicas de inspección basadas en IA, análisis de datos en tiempo real con IoT e inspección con realidad virtual (RV). En conclusión, la elección de la técnica adecuada dependerá del objetivo específico, el nivel de experticia del profesional y la disponibilidad de información. Es importante proporcionar capacitación y acceso a información para profesionales que trabajen con técnicas avanzadas.

### **Tabla 16**

*Cuadro Comparativo de la Implementación de las Técnicas de Inspección*

<b>Técnica/Equipo</b>	<b>Costo</b>	<b>Tiempo de implementación</b>	<b>de Humedad de la superficie</b>	<b>Temperatura de la superficie</b>
-----------------------	--------------	---------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------

Inspección visual	\$1.000.000 - \$10.000.000 COP por proyecto	Rápido	0% a 90%	-20°C a 50°C
Inspección por líquidos penetrantes	\$5.000.000 - \$50.000.000 COP por proyecto	Rápido	0% a 60%	-10°C a 50°C
Inspección magnética	\$50.000.000 - \$250.000.000 COP por proyecto	Lento	0% a 60%	-20°C a 100°C
Radiografía industrial	\$100.000.000 - \$500.000.000 COP por proyecto	Lento	0% a 80%	-20°C a 100°C
Ultrasonido	\$100.000.000 - \$500.000.000 COP por proyecto	Lento	0% a 90%	-20°C a 150°C
Corrientes de Eddy	\$100.000.000 - \$500.000.000 COP por proyecto	Lento	0% a 70%	-20°C a 150°C
Inspección basada en riesgos	\$100.000.000 - \$500.000.000 COP por proyecto	Lento	No aplica	No aplica, solo evalúa riesgos en lugar de superficie

Inspección con drones	\$20.000.000 - \$100.000.000 COP por proyecto	Rápido	0% a 90%	-20°C a 50°C
Inspección con robots	\$100.000.000 - \$500.000.000 COP por proyecto	Lento	0% a 80%	-20°C a 100°C
Técnicas de inspección basadas en IA	\$100.000.000 - \$700.000.000 COP por proyecto	Lento	0% a 90%	-20°C a 50°C
Monitoreo en tiempo real con sensores IoT	\$20.000.000 - \$100.000.000 COP por proyecto	Rápido	0% a 100%	-50°C a 150°C
Análisis de datos en tiempo real con IoT	\$50.000.000 - \$300.000.000 COP por proyecto	Lento	0% a 100%	-50°C a 150°C
Inspección con realidad aumentada (RA)	\$20.000.000 - \$100.000.000 COP por proyecto	Rápido	0% a 90%	-20°C a 50°C
Inspección con realidad virtual (RV)	\$50.000.000 - \$200.000.000	Lento	0% a 90%	-20°C a 50°C

---

COP por  
proyecto

---

*Nota.* Es importante tener en cuenta que estos precios son aproximados y pueden variar dependiendo de la aplicación específica, el equipo utilizado y la complejidad de la inspección. Tomado de ASNT, API y RBI; de empresas como Applus+ y Bureau Veritas que ofrecen servicios de este tipo en Colombia, siendo líderes en inspección industrial en el sector petrolero.

El análisis de la información revela que las técnicas de inspección varían significativamente en términos de costo, tiempo de implementación, humedad de la superficie y temperatura de la superficie de trabajo. Esto sugiere que la elección de la técnica adecuada dependerá del objetivo específico, el presupuesto disponible, el tiempo de implementación y las condiciones ambientales.

En cuanto al costo, la inspección visual es la técnica más económica, con un costo bajo. Por otro lado, la radiografía industrial, ultrasonido, inspección con drones, inspección con robots, técnicas de inspección basadas en IA, monitoreo en tiempo real con sensores IoT, análisis de datos en tiempo real con IoT, inspección con realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV) son las técnicas más costosas, con un costo alto.

Respecto al tiempo de implementación, la inspección visual, inspección con drones, monitoreo en tiempo real con sensores IoT y análisis de datos en tiempo real con IoT son las técnicas más rápidas de implementar, con un tiempo de implementación rápido. Por otro lado, la radiografía industrial, ultrasonido, inspección con robots, técnicas de inspección

basadas en IA y realidad virtual (RV) son las técnicas más lentas de implementar, con un tiempo de implementación lento.

En cuanto a la humedad de la superficie, la mayoría de las técnicas pueden funcionar en un rango de humedad del 0% al 90%. Sin embargo, el monitoreo en tiempo real con sensores IoT y análisis de datos en tiempo real con IoT pueden funcionar en un rango de humedad del 0% al 100%.

Finalmente, en cuanto a la temperatura de la superficie, la mayoría de las técnicas pueden funcionar en un rango de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ . El ultrasonido puede funcionar en un rango de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , mientras que el monitoreo en tiempo real con sensores IoT y análisis de datos en tiempo real con IoT pueden funcionar en un rango de temperatura de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ .

En conclusión, la elección de la técnica adecuada dependerá del objetivo específico, el presupuesto disponible, el tiempo de implementación y las condiciones ambientales. Es importante considerar estos factores al seleccionar una técnica de inspección para asegurarse de que se ajuste a las necesidades específicas del proyecto.

### ***Flujograma de las Técnicas de Inspección***

La elección de la técnica de inspección adecuada en la industria petrolera es crucial para garantizar la seguridad, la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones. La tabla comparativa muestra que cada técnica tiene sus ventajas y desventajas, y que la selección de la técnica adecuada dependerá de las necesidades específicas de la industria y de la disponibilidad de recursos.

Por lo que en el caso de la inspección visual es una técnica tradicional y ampliamente utilizada, pero tiene limitaciones en términos de precisión y alcance. Por otro lado, la inspección con rayos X ofrece una mayor precisión y alcance que la inspección visual, pero requiere equipo especializado y personal calificado.

En cuanto a una técnica no destructiva se tiene la inspección con ultrasonido que ofrece una mayor precisión y alcance que la inspección con rayos X, y es especialmente útil para detectar defectos en tuberías y equipos. La inspección con corrientes inducidas es otra técnica no destructiva que ofrece una mayor precisión y alcance que la inspección con ultrasonido, y es especialmente útil para detectar defectos en equipos y tuberías metálicas.

Por último, la inspección con sensores y dispositivos IoT es una técnica emergente que ofrece una mayor precisión y alcance que las técnicas tradicionales, así como la capacidad de monitorear en tiempo real. Esta técnica es especialmente útil para detectar anomalías y defectos en equipos y tuberías, y para prevenir fallos y accidentes.

En resumen, la selección de la técnica de inspección adecuada dependerá de las necesidades específicas de la industria petrolera y de la disponibilidad de recursos. Es importante considerar los beneficios y limitaciones de cada técnica para garantizar la seguridad, la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones. La combinación de técnicas puede ser la mejor opción para obtener una inspección completa y precisa.

En general, la elección de la técnica de inspección adecuada dependerá de factores como:

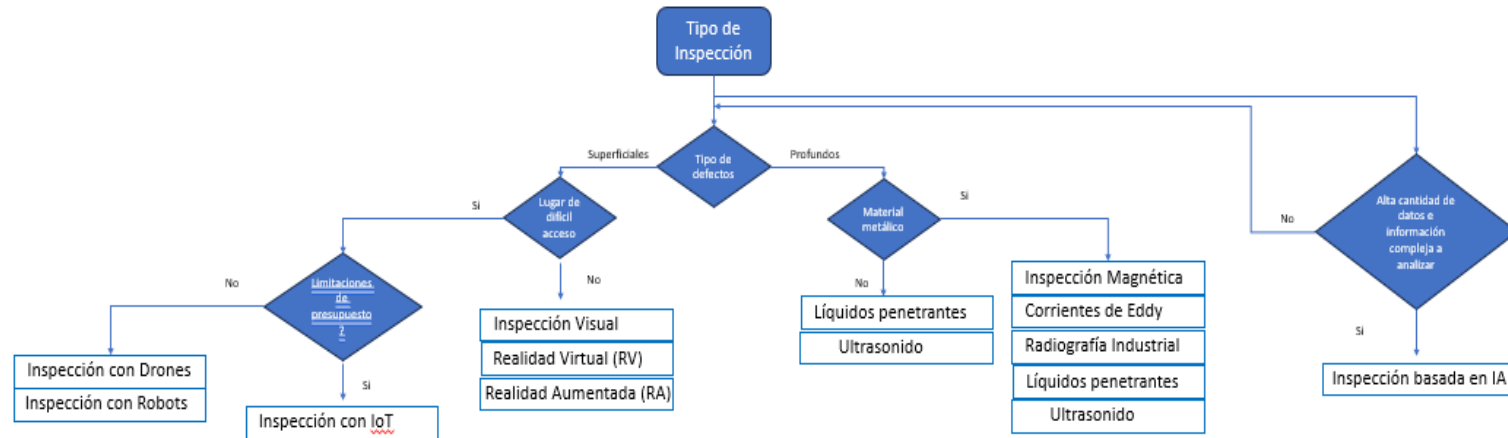
- Tipos de defectos a detectar (Corrosión, externo, interno)
- Material por inspeccionar

- Accesibilidad a la zona
- Condiciones ambientales
- Presupuesto
- Tiempo de inspección
- Disponibilidad de información
- Nivel de experticia requerido.

A partir de estos criterios, en la figura 19 se presenta un diagrama de flujo que determina las técnicas más apropiadas dado un conjunto de condiciones preestablecidas.

**Figura 19**

*Tipos de Inspección a Utilizar*



*Nota.* Tipos de inspección a utilizar. Elaboración propia, (2024).

Este diagrama de flujo incluye características específicas para cada inspección, como: áreas de difícil acceso para la inspección visual, detección de defectos internos, inspección de áreas amplias apropiado para la inspección con drones, análisis de datos complejos apropiado para la inteligencia artificial, simulación de escenarios apropiado para uso de realidad virtual y aumentada.

Se recomienda utilizar técnicas avanzadas como inspección con drones y robots, y técnicas de inspección basadas en IA para tareas complejas y precisas. Para tareas rutinarias y de baja complejidad, se pueden utilizar técnicas simples como inspección visual y ultrasonido.

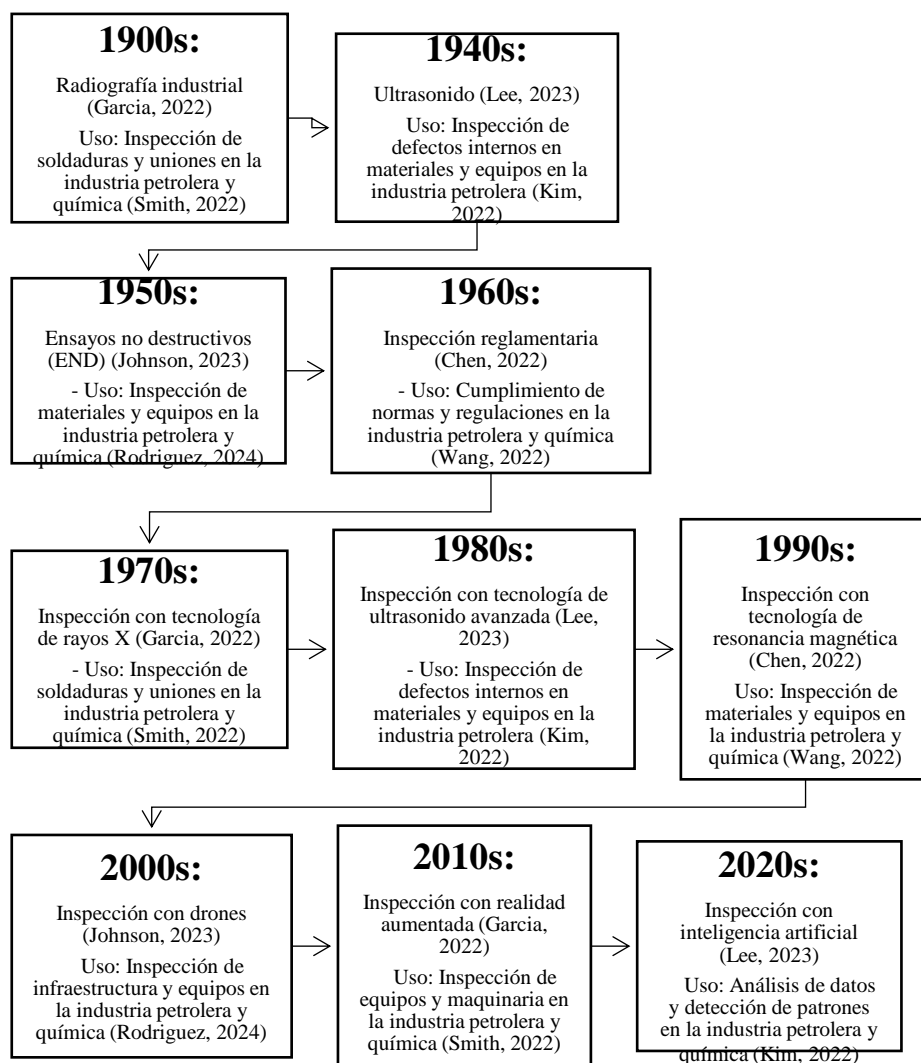
### **Importancia de la Innovación Tecnológica Enfocada a la Inspección en la Industria Petrolera, Así Como Su Potencial Aplicabilidad y Beneficios en Otros Sectores**

La innovación tecnológica en la inspección de la industria petrolera es fundamental para mejorar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las operaciones. Las inspecciones son cruciales para evaluar el estado físico y mecánico de los equipos, identificar fallas y prevenir riesgos, asegurando la protección de personas y activos. Además, cumplen un rol clave en el mantenimiento correctivo y predictivo, permitiendo tomar acciones correctivas ante posibles defectos. La adopción de tecnologías avanzadas, como drones y robots, ha demostrado ser una estrategia eficiente para reducir costos y tiempos operativos, optimizando los procesos y cumpliendo con estrictos estándares regulatorios. Estas tecnologías tienen un potencial aplicable no solo en la industria petrolera, sino también en otros sectores industriales, donde la reducción de costos, el aumento de la eficiencia y la seguridad son prioritarios.

En la figura 20 se muestra una línea de tiempo que da cuenta la evolución que se ha tenido a través de las décadas de las tecnológicas en la inspección aplicada en la industria petrolera.

**Figura 20**

*Evolución de las Tendencias en la Inspección Petrolera*



*Nota.* Evolución. Elaboración propia, (2024).

Dentro de las principales tendencias utilizadas actualmente para las inspecciones se tienen:

### ***Realidad Aumentada y Realidad Virtual en la Inspección de Activos***

Utilizadas para mejorar la precisión y eficiencia de la inspección en la industria petrolera. Según Montalvo et al., (2020) estas tecnologías permiten superponer información digital en tiempo real sobre activos físicos, lo que facilita la identificación de problemas y la toma de decisiones más inteligentes. Los empleados pueden ver información técnica, manuales de mantenimiento e incluso recibir orientación instantánea sobre inspecciones, reduciendo errores y mejorando la eficiencia.

### ***Inspecciones Basadas en Inteligencia Artificial***

La inteligencia artificial (IA) está transformando las inspecciones en la industria petrolera. Los algoritmos de inteligencia artificial pueden analizar grandes cantidades de datos recopilados durante las inspecciones y detectar patrones o anomalías que pueden resultar difíciles de reconocer para los humanos. Esto permite una toma de decisiones más rápida y precisa y una identificación temprana de posibles problemas de activos (López, 2022).

### ***Monitoreo Continuo Mediante Sensores Inteligentes***

Estos dispositivos se pueden colocar en equipos y estructuras para monitorear continuamente variables como temperatura, vibración y presión. Los datos recopilados instantáneamente se analizan para detectar cualquier cambio o anomalía, de modo que las actividades de mantenimiento puedan planificarse rápidamente y prevenir fallas catastróficas (Casalet, 2018).

### *Uso de Drones*

Los drones, también conocidos como vehículos aéreos no tripulados (UAV), se presentan en muchas formas y son particularmente útiles para las inspecciones de infraestructura petrolera. Los UAV multirrotor son populares por sus capacidades de vuelo y maniobrabilidad precisa, lo cual es esencial para inspeccionar estructuras complejas desde múltiples ángulos. Los drones de ala fija, por otro lado, son ideales para monitorear ductos extendidos y áreas grandes debido a su mayor autonomía y capacidades de cobertura de largo alcance. Además, los drones híbridos combinan las ventajas de ambos tipos, pudiendo despegar y aterrizar verticalmente y volar durante largos periodos de tiempo (Pallares, 2015).

El objetivo del uso de drones por parte de las industrias es reducir significativamente el número de heridos durante las inspecciones internas y externas. Aparte del ahorro de costes, uno de los mayores beneficios de utilizar drones para inspecciones en interiores es la seguridad industrial de los trabajadores.

En términos de tecnología a bordo, el dron utiliza una variedad de cámaras y sensores para realizar inspecciones detalladas. Las cámaras RGB tradicionales capturan imágenes de alta resolución para ayudar a identificar problemas visuales en su infraestructura. Las cámaras térmicas pueden detectar diferencias de temperatura, que son esenciales para identificar fugas de hidrocarburos o daños en el aislamiento. Además, los sensores de detección y alcance de luz (LIDAR) proporcionan modelos 3D precisos del entorno, lo que permite una evaluación estructural detallada. Finalmente, sensores especializados, como los detectores de gas de algunos drones, son capaces de detectar y cuantificar la concentración de gas emitido por la infraestructura, lo que puede ayudar en el mantenimiento y la seguridad ambiental (Alharam et al., 2020).

Las principales ventajas del uso de drones en la inspección petrolera son: Ahorra costes y tiempo, una de las principales ventajas del uso de drones en las inspecciones es el importante ahorro de costes y tiempo. En comparación con los métodos tradicionales que implican un equipo de inspección humano y un andamio o una grúa para alcanzar la altura, los drones pueden realizar la misma tarea en un corto período de tiempo y sin estructuras costosas. Además, la capacidad de los drones para realizar múltiples inspecciones a lo largo del día reduce significativamente el tiempo de inactividad de las plataformas e instalaciones petroleras.

Mejorar la seguridad, la seguridad es una preocupación importante en la industria petrolera y los drones ofrecen una oportunidad para reducir el riesgo para el personal. Al utilizar drones para realizar inspecciones, los trabajadores pueden reducir los peligros asociados con las alturas y los entornos potencialmente inestables. Esto no sólo protege a los empleados, sino que también reduce la responsabilidad de la empresa y los costos de seguro.

Acceder a lugares de difícil acceso, la infraestructura petrolera a menudo contiene áreas que son extremadamente difíciles o peligrosas para los humanos. Los drones son ideales para acceder a estas áreas, ya sea que se encuentren encima de plataformas de perforación altas, en tanques de almacenamiento o debajo de plataformas marinas. Su capacidad para maniobrar en espacios reducidos y capturar detalles desde ángulos únicos es invaluable.

Recopilación de datos instantánea, los drones equipados con sistemas de transmisión avanzados pueden proporcionar a los operadores datos e imágenes instantáneos. Esto permite tomar decisiones rápidas basadas en la información más actualizada esencial para el mantenimiento preventivo y la respuesta a emergencias. La recopilación de datos en tiempo real

mediante drones también ayuda a crear registros históricos para el seguimiento a largo plazo de las condiciones de la infraestructura.

### *Casos Prácticos*

#### **Tabla 17**

##### *Casos Prácticos en la Industria Petrolera*

---

<b>BP</b>	Fue la primera compañía de la industria en emplear drones para los estudios de sus instalaciones. Ahora no solo utiliza estos equipos, actualmente cuenta con robots submarinos para inspeccionar y realizar tareas de mantenimientos en sus plataformas offshore. Gracias la empresa puede realizar inspecciones y mantenimientos en sus activos sin poner en peligro a su personal (Castellà, 2024).
<b>Chevron</b>	La empresa petrolera estadounidense actualmente emplea la realidad virtual en sus refinerías; lo cual, ha ayudado a reducir considerablemente el tiempo y el dinero invertidos en los procesos de mantenimiento. Las gafas de realidad virtual utilizadas en la práctica simulan los equipos de la refinería y los datos de los sensores superpuestos en el modelo 3D permiten a un técnico identificar el problema y aportar soluciones con rapidez (Chen, 2023).
<b>ExxonMobil</b>	Ha introducido una plataforma de capacitación inmersiva en 3D en sus instalaciones de investigación. Con ayuda de la realidad virtual para desarrollar técnicas de formación práctica. Esta plataforma genera un entorno que brinda a los supervisores e ingenieros un profundo conocimiento de maquinaria y procesos (Odremán, 2024). La simulación puede recrear diversas situaciones de la vida real, como cortes de energía no programados, actividades anómalas y gestión de emergencias, en un entorno seguro y controlado. De esta forma los

---

---

participantes pueden explorar posibles escenarios y desarrollar estrategias de respuesta efectivas.

**Baker** Su manera de adoptar la revolución en sus procesos fue a través de la  
**Hughes** implementación de cascos inteligentes. Estos equipos de seguridad desarrollados pueden mostrar imágenes, esquemas y secuencias de videos para las inspecciones y tareas de mantenimiento. También cuentan con cámara, auriculares y micrófono para realizar orientaciones y asistencias remotamente (García, 2022).

---

*Nota.* Casos prácticos. Elaboración propia, (2024).

En conclusión, las compañías petroleras como BP, Chevron, ExxonMobil y Baker Hughes están adoptando tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia, seguridad y rentabilidad de sus operaciones. Estas tecnologías incluyen drones, robots submarinos, realidad virtual, plataformas de capacitación inmersiva en 3D y cascos inteligentes, que están revolucionando la forma en que la industria petrolera opera.

La implementación de drones y robots submarinos ha permitido a estas compañías realizar inspecciones y mantenimientos de manera más segura y eficiente, sin poner en peligro a su personal. Esto ha reducido el riesgo de accidentes y lesiones, y ha permitido a las compañías ahorrar tiempo y recursos.

La realidad virtual y las plataformas de capacitación inmersiva en 3D han mejorado la capacitación y el desarrollo de habilidades de los empleados. Esto ha permitido a las compañías asegurarse de que su personal esté bien preparado para enfrentar situaciones complejas y emergencias, y ha reducido el tiempo y el costo de los procesos de capacitación.

Los cascos inteligentes han permitido a las compañías realizar orientaciones y asistencias remotamente, lo que ha mejorado la eficiencia y la seguridad de los procesos de mantenimiento. Esto ha permitido a las compañías reducir el tiempo y el costo de los procesos de mantenimiento, y ha mejorado la seguridad de su personal.

En general, la adopción de estas tecnologías está permitiendo a las compañías petroleras ser más competitivas y sostenibles en el futuro. Estas tecnologías están mejorando la eficiencia, la seguridad y la rentabilidad de las operaciones, y están permitiendo a las compañías reducir su impacto ambiental.

Es importante destacar que la adopción de estas tecnologías es un proceso continuo, y que las compañías petroleras deben estar dispuestas a invertir en investigación y desarrollo para mantenerse al día con las últimas innovaciones. Sin embargo, es claro que la adopción de estas tecnologías es un paso en la dirección correcta para la industria petrolera.

### ***Temas de Investigación Actuales en Inspección***

El sector petrolero está experimentando una transformación constante, y el proceso de extracción de mismo, no es la excepción. La tecnología avanzada y el enfoque en la eficiencia y la seguridad están impulsando cambios significativos en este campo (Ahmed, 2022). A continuación, se presentan algunas tendencias del sector petrolero:

1. Automatización y robótica: La automatización y la robótica están revolucionando la industria petrolera. La automatización permite una mayor precisión y eficiencia en la recopilación de datos, lo que mejora la calidad de los resultados. La robótica, por su parte, permite la realización de tareas peligrosas y complejas de manera segura y eficiente (Garcia, 2022).

2. Análisis de datos: La cantidad de datos generados es abrumadora. Para aprovechar estos datos de manera efectiva, es necesario un análisis exhaustivo. Las herramientas de análisis de datos están mejorando rápidamente, y es probable que se vea una mayor utilización de ellas en este proceso en el futuro (Davis, 2023).

3. Integración de sensores y dispositivos IoT: La integración de sensores y dispositivos IoT es una tendencia importante en la industria petrolera. Estos sensores permiten una mayor precisión y una recopilación más eficiente de datos en tiempo real, lo que mejora la toma de decisiones y la eficiencia del proceso (Odremán, 2024).

4. Uso de la inteligencia artificial: La inteligencia artificial está comenzando a tener un impacto significativo en la industria petrolera, y es probable que veamos una mayor utilización de ella en el proceso de extracción de petróleo en el futuro. La inteligencia artificial puede analizar grandes cantidades de datos en busca de patrones o tendencias, lo que mejora la eficiencia y la precisión del proceso (Rodríguez, 2024).

5. La nanotecnología: La nanotecnología en la inspección petrolera es un campo que aún está en desarrollo, pero que promete revolucionar la forma en que se realizan las inspecciones en la industria petrolera.

Con la nanotecnología se tiene el potencial de transformar los mecanismos y procesos de Recuperación mejorada de petróleo, esta tecnología tiene la posibilidad de introducir cambios revolucionarios en varias áreas de la industria petrolera, por ejemplo, nanosensores, podrán proporcionar información más detallada y precisa sobre los yacimientos, la fabricación de nanopartículas puede ser utilizadas para la inhibición de la escala, los nanomateriales estructurales podrán permitir el desarrollo de mejores equipos para la industria petrolera que

sería mucho más ligero y más fiables y de larga duración, y mejorando las nano membranas se podrá separar el gas y se eliminaría las impurezas del aceite (Brown, 2022).

- La nanotecnología puede ser utilizada para desarrollar sensores y dispositivos que permitan detectar defectos y anomalías en los equipos y tuberías de la industria petrolera de manera más precisa y eficiente.

- Ventajas: La nanotecnología puede ofrecer varias ventajas en la inspección petrolera, como la capacidad de detectar defectos a nivel molecular, lo que puede permitir una detección más temprana de problemas y una reducción de costos asociados con la reparación y mantenimiento de equipos.

- Desafíos: Aunque la nanotecnología tiene un gran potencial en la inspección petrolera, todavía existen desafíos que deben ser superados, como la necesidad de desarrollar materiales y dispositivos que sean capaces de operar en condiciones extremas, como altas temperaturas y presiones.

En resumen, la tecnología está mejorando rápidamente, y la automatización y la robótica, el análisis de datos, la integración de sensores y dispositivos IoT, la nanotecnología y la inteligencia artificial son tendencias clave que dominarán el futuro de la industria petrolera (Patel, 2022). Estos avances permitirán una mayor eficiencia, precisión y seguridad en el proceso, lo que a su vez mejorará la calidad de los resultados y la toma de decisiones informadas.

En cuanto a los beneficios, ventajas y aplicaciones de las tecnologías innovadoras en la industria petrolera y que pueden usarse en otros sectores industriales se resaltan:

### ***Toma de Decisiones Mejorada Basada en Datos Precisos***

La tecnología de inspección proporciona datos precisos y detallados sobre el estado de los activos petroleros, lo que permite tomar decisiones estratégicas informadas sobre el mantenimiento, la reparación y la inversión de los activos. Con datos confiables, las empresas pueden optimizar sus operaciones y aumentar la eficiencia.

### ***Reduce los Costos y el Tiempo de Inactividad***

Reduce los costos asociados con reparaciones no planificadas y el tiempo de inactividad. La detección temprana de problemas permite a las empresas realizar un mantenimiento predictivo y planificado, evitar costosas fallas catastróficas y reducir el tiempo de inactividad no planificado.

### ***Detecta Problemas y Solucionar Fallas Previamente***

La detección temprana de problemas con los activos petroleros permite tomar acciones correctivas antes de que los problemas empeoren, lo que ayuda a extender la vida útil del activo, evitar reparaciones costosas y reducir los riesgos de seguridad.

### ***Mejora la Seguridad y el Cumplimiento***

Ayuda a mejorar la seguridad en la industria petrolera al reducir la exposición de los trabajadores a entornos peligrosos. Por ejemplo, el uso de drones para realizar inspecciones en áreas de difícil acceso puede evitar que los trabajadores queden expuestos a alturas o condiciones peligrosas. La implementación de estas tecnologías avanzadas también puede facilitar el cumplimiento de las normas y estándares de seguridad.

### ***Optimiza el Mantenimiento de Activos***

Monitorea continuamente el estado operativo de los activos mediante sensores inteligentes y análisis de datos, las empresas pueden implementar estrategias de mantenimiento predictivo y planificado.

### ***Mejora la Calidad de los Exámenes***

La realidad aumentada y la realidad virtual mejoran la calidad y precisión de los exámenes. Estas herramientas brindan inmediatamente información y orientación adicional, lo que facilita la identificación de problemas y la toma de decisiones informadas durante las inspecciones.

Cada uno de estos avances tecnológicos, junto con las ventajas y beneficios que dejan para el sector petrolero, afirma que el uso de estas técnicas y herramientas permite a otros sectores mejorar las operaciones, reducir costos, reducir el tiempo de inactividad, aumentar la seguridad y extender la vida útil de los activos. Por lo que, a través de este estudio se demuestra que la tecnología innovadora puede tener un impacto positivo en la industria petrolera y otros sectores para mejorar la eficiencia, la rentabilidad y la sostenibilidad en un mercado altamente competitivo.

## Conclusiones

Hoy en día, se puede pensar en la inspección autonómica, ya que, con la ayuda de la visión artificial avanzada mediante algoritmos y método de aprendizaje profundo. Es por esto que se presenta la inspección con robots que, equipados con cámaras de alta definición, el sistema robótico puede transmitir video en vivo, lo que permite a los trabajadores realizar inspecciones visuales instantáneas en entornos difíciles de alcanzar e inaccesibles, pero que sin embargo están altamente vigilados.

La industria se encuentra en permanente evolución y desarrolla para llegar a una solución de detección que pueda implementarse permanentemente en cualquier campo industrial, con énfasis en el sector petrolero, que no afecte la producción de petróleo, y garantice la seguridad en ambientes volátiles, rentable, que requiera poca o ninguna energía y que no tenga ninguna alteración o intrusión en la pared de la tubería.

Es por esto que se habla de las inspecciones no destructivas, ya que ayudan a establecer un control de calidad adecuado. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, estas técnicas de inspección tienen limitaciones ya que no todas las técnicas están disponibles y los precios pueden variar debido a los diferentes tamaños de elementos y la complejidad del lugar donde se realice. Pero con la ayuda de la tecnología y la inteligencia artificial, los sistemas de inspección automatizados podrían ayudar a la industria petrolera, ya que puede realizar las inspecciones con un sacrificio mínimo en la seguridad del personal, el tiempo y el costo.

Como resultado del análisis documental se puede concluir que el mantenimiento y las inspecciones requieren de tiempo y son riesgosas para quienes realizan las inspecciones, por lo tanto, se recomienda que los trabajadores deben recibir ropa protectora, recibir capacitación

continúa en el uso de procedimientos de seguridad y mantenerse actualizados con la práctica de técnicas mejoradas de inspección de equipos. Por otro lado, una forma de solucionar esto es confiar el trabajo a drones autónomos.

Por último, según la importancia de los avances tecnológicos, es necesario resaltar que, a pesar de los numerosos beneficios, todavía existen grandes desafíos a la hora de adoptar la revolución 4.0 en la industria del petróleo. La falta de madurez digital se cita como la principal razón del fracaso de estas iniciativas. Según el análisis documental realizado, la madurez digital entre las empresas de petróleo es muy baja.

La industria se está quedando atrás en lo que respecta al uso inmediato de datos y conocimientos. Como gran parte del negocio en esta industria es transfronterizo y de naturaleza fragmentada, la implementación flexible y oportuna de las iniciativas de la Revolución 4.0 se convierte en un desafío. Por lo que, se puede decir que la falta de experiencia técnica interna, la resistencia a los cambios en las prácticas tradicionales y los problemas de cumplimiento de la industria son otras barreras que enfrentan las empresas al probar estas nuevas tecnologías. La revolución 4.0 en la inspección de activos en la industria del petróleo implica la adopción de tecnologías avanzadas y la integración de entornos físicos y digitales para mejorar la eficiencia y la toma de decisiones en las operaciones de inspección de activos.

Por lo tanto, es importante abordar estas cuestiones para lograr mejores resultados y estándares de prueba. La cuarta revolución industrial del petróleo y el gas está todavía en sus inicios. Sin embargo, la forma en que las empresas utilizan los datos, se comunican y gestionan los activos seguirá convergiendo, evolucionando y transformándose.

## Bibliografía

- Ahmed, S. (2022). Tendencias en la inspección petrolera: Un enfoque en la automatización y la robótica. *Journal of Petroleum Technology*, 74(10), 1-10.
- Alharam, Aysha, et al. (2020). "Real time AI-based pipeline inspection using drone for oil and gas industries in Bahrain." *International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing and Technologies (3ICT)*. IEEE.
- Aljuaid, K. G., Albuoderman, M. A., AlAhmadi, E. A., & Iqbal, J. (2020, October). Comparative Review of Pipelines Monitoring and Leakage Detection Techniques. In *2020 2nd International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Allibert, Guillaume, et al. (2019). "Pipeline following by visual servoing for Autonomous Underwater Vehicles." *Control Engineering Practice* 82 151-160.
- API (2020). API 5L: Especificación para tuberías de acero al carbono para la industria petrolera. American Petroleum Institute.
- Arduiz Gacitúa, J. A. (2023). Implementación de la metodología de inspección basada en riesgo en análisis cualitativo para equipos estáticos del área de fibra, Celulosa Arauco-Planta Arauco.
- ASME (2020). ASME B31.4: Código para la construcción de tuberías para la transmisión de petróleo y gas. American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM (2020). ASTM D2992: Especificación para tuberías de fibra de vidrio para la industria petrolera. American Society for Testing and Materials.

- AWS (2020). AWS D1.1: Especificación para la soldadura de acero en la industria petrolera. American Welding Society.
- Broek, D. (2019). Elementary engineering fracture mechanics. Martinus Nijhoff Publishers.
- Brown, T. (2022). Innovación en la inspección petrolera: Uso de la realidad virtual. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209-2010, 1-15.
- Brown, T. (2022). Innovación en la inspección petrolera: Uso de la biotecnología y la nanotecnología. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 212, 1-15.
- Brown, T. (2022). Tendencias futuras en la inspección petrolera. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 1-15.
- Cano, J. E. S. (2020). Gestión energética, automatización industrial y tecnologías de información y comunicación. Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Carballini J. and F. Viana, (2015). "Using synthetic aperture sonar as an effective tool for pipeline inspection survey projects," *IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/RIOAcoustics.2015.7473589.
- Casalet, M. (2018). La digitalización industrial. Un camino hacia la gobernanza colaborativa. Santiago: CEPAL.
- Castellà San Juan, O. (2024). Análisis y diseño de los procesos de inspección en instalaciones de válvulas a lo largo de la vida útil de estos tipos de instalaciones petrolíferas (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

- Chen, P., Li, R., Jia, G., Lan, H., Fu, K., & Liu, X. (2023). A Decade Review of the Art of Inspection and Monitoring Technologies for Long-Distance Oil and Gas Pipelines in Permafrost Areas. *Energies*, *16*(4), 1751.
- Chen, Y. (2022). Virtual Reality-Based Inspection: A Review of the Current State of the Art. *Journal of Nondestructive Testing*, *27*(10), 1-12.
- Chen, Y. (2023). Drone-Based Inspection: A Review of the Current State of the Art. *Journal of Nondestructive Testing*, *29*(2), 1-12.
- Chen, Y. (2023). Innovación en la inspección petrolera: Uso de la visión artificial. *Journal of Petroleum Engineering*, *23*(2), 1-12.
- Chen, Y. (2023). Innovación en la inspección petrolera: Uso de la robótica autónoma. *Journal of Petroleum Engineering*, *24*(1), 1-12.
- Chen, Y. (2023). Innovación en la inspección petrolera: Uso de la realidad aumentada y la realidad virtual. *Journal of Petroleum Engineering*, *24*(2), 1-12.
- Chen, Y. (2023). IoT-Based Monitoring: Techniques and Applications. *Journal of Inspection and Testing*, *16*(5), 1-15.
- Chhabhaiya, N. K., & Bhojane, P. (2023). Developing an IoT-Based Internal Pipe Inspection Robot Challenges, Solutions & Future Directions.
- Co-requisitos, P. R. (2024). Tendencias Tecnológicas en la Industria Petrolera (Doctoral dissertation, Universidad Veracruzana).
- Davis, J. (2023). Análisis de datos en la inspección petrolera: Un enfoque en la inteligencia artificial y el aprendizaje profundo. *Journal of Data Science and Engineering*, *3*(1), 1-12.

De Verger, Fernando Ramírez. (2017). Estudio de la "financiarización" del petróleo mediante modelos inferenciales de previsión de precios y el análisis de su impacto en la incertidumbre del mercado a través de reticulados binomiales. Diss. Universidad Autónoma de Madrid.

Dender-Zurita, P. M. Guilcatoma-Moreira, J. G. Argandoña-Moreira, and M. P. Machuca-Avalos. (2017). "Gestión de redes de sensores inalámbricos (WSN) para la industria petrolera," *Polo del conocimiento*, vol. 2, no. December, pp. 15–30, 2017, doi: 10.23857/casedelpo.2017.2.12.dic.15-30.

Dender-Zurita, Roberto C., et al. (2018). Management of wireless sensor networks (WSN) for the oil industry. *Polo del conocimiento* 2.12: 15-30.

Escorcia-Barrios, F., Medina-Cardenas, A., Cuello-Navarro, J., Velázquez Gutiérrez, K., Escorcia-Gutiérrez, J., y Soto-Díaz, R. (2021). Análisis comparativo de juntas soldadas mediante el proceso GMAW con técnicas de inspección visual e inspección visual mediante visión artificial. *Revista Sextante*, 19-28.

Fer, M. (2021). Trends and challenges in oil and gas pipeline inspection. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(2), 04021004.

Fernández, A. A. Neto and D. D. Rodríguez. (2019). "Pipeline inspection with AUV," 2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), Rio de Janeiro, Brazil, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/RIOAcoustics.2019.7473607.

Fernando, R. L. D., & Danilo, B. M. G. (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*, 7(5), 1298-1318.
- Fez Martínez, R. D. (2021). Inspecciones técnicas con tecnología dron de buques mercantes, de recreo y su impacto COVID-19 (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Fontana, M. G. (2021). *Corrosion engineering*. McGraw-Hill.
- Garcia, M. (2022). AI-Based Inspection: A Review of the Current State of the Art. *Journal of Nondestructive Testing*, 27(11), 1-15.
- Garcia, M. (2022). Industrial Radiography: Principles and Applications. *Journal of Nondestructive Testing*, 27(2), 1-15.
- Garcia-Hernández, A. (2022). Automatización y robótica en la inspección petrolera: Un enfoque en la eficiencia y la productividad. *Journal of Automation and Robotics*, 17(1), 1-10.
- Gómez, J. C., y de la Torre Silva, F. (2018). Introducción a la inspección basada en riesgo.
- Hernández, J. (2023). Integración de sensores y dispositivos IoT en la inspección petrolera: Un enfoque en la seguridad, la salud y el medio ambiente. *Journal of IoT and Sensor Networks*, 4(2), 1-12.
- Hernández, M. (2022). Integración de sensores y dispositivos IoT en la inspección petrolera. *Journal of Sensors and Actuators*, 25(1), 1-10.
- Hertzberg, R. W. (2019). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. John Wiley & Sons.

Hopgood, Adrian A. (2021). *Intelligent systems for engineers and scientists: a practical guide to artificial intelligence*. CRC press.

Hopgood, J. (2021). Advanced inspection technologies for oil and gas infrastructure. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(4), 043101.

International Energy Agency (IEA). (2020). *World Energy Outlook 2020*.

Jara Alonso, Javier Andrés. (2022). "Sistema robotizado para inspección interna y externa de tanques de almacenamiento de hidrocarburos, aplicando metodología de inspección visual y ultrasonido tipo Scan C."

Johnson, K. (2023). Visual Inspection: Techniques and Applications. *Journal of Inspection and Testing*, 16(2), 1-12.

Kim, H. (2023). Integración de sensores y dispositivos IoT en la inspección petrolera: Un enfoque en la precisión y la exactitud. *Journal of IoT and Sensor Networks*, 4(1), 1-12.

Kim, J. (2022). AR-Based Inspection: Techniques and Applications. *Journal of Inspection and Testing*, 15(10), 1-12.

Kim, J. (2022). Robotic Inspection: A Guide to Best Practices. *Journal of Nondestructive Testing*, 27(8), 1-10.

L. Yu et al., (2019) "Inspection Robots in Oil and Gas Industry: A Review of Current Solutions and Future Trends," 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Lancaster, UK, 2019, pp. 1-6, doi: 10.23919/ICAC.2019.8895089.

Lee, S. (2022). Augmented Reality-Based Inspection: A Guide to Best Practices. *Journal of Nondestructive Testing*, 27(9), 1-10.

- Lee, S. (2022). Técnicas de inspección avanzadas en la industria petrolera: Un enfoque en la inspección óptica. *Journal of Petroleum Technology*, 74(13), 1-10.
- Lee, S. (2022). Técnicas de inspección avanzadas en la industria petrolera: Un enfoque en la inspección de tuberías. *Journal of Petroleum Technology*, 75(2), 1-10.
- Lee, S. (2023). Robotic Inspection: Techniques and Applications. *Journal of Inspection and Testing*, 16(3), 1-12.
- Lee, S. (2023). Ultrasonic Testing: A Guide to Best Practices. *Journal of Nondestructive Testing*, 29(1), 1-10.
- López Vargas, N. F. (2022). Revisión sistemática de metodologías de mantenimiento de oleoductos basadas en Industria 4.0 (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.
- López-Estrada, Patricia, Lady Fernández-Mora, and Estefanía Pérez-Hidalgo. (2023). "El papel de la investigación cualitativa en los proyectos de extensión universitaria como un proceso de reflexión sobre el alcance obtenido: el caso de San Ramón de La Virgen de Sarapiquí." *Investiga. TEC* 16.46, 16-25.
- Martin, K. (2023). Uso de la realidad aumentada en la inspección petrolera. *Journal of Artificial Intelligence in Industry*, 2(1), 1-12.
- Mattar, R. A., & Kalai, R. (2018). Development of a wall-sticking drone for non-destructive ultrasonic and corrosion testing. *Drones*, 2(1), 8.
- Medina, R. (2022). Tipos de mantenimiento en las unidades de medición de producción de pozos petroleros. *Revista Enfoques*, 6(21), 37-49.

- Montalvo, W., Garcia, C. A., Naranjo, J. E., Ortiz, A., & Garcia, M. V. (2020). Sistema de Teleoperación para Robots Móviles en la industria del Petróleo y Gas. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E29), 351-365.
- Morales, P. A. (2022). Las tecnologías emergentes y la industria gas y oil: una revisión bibliográfica. *Cuadernos de Investigación Serie Administración*, (4), 41-57.
- Mthimkhulu, Zinhle, Hannah Adebajo, and Timothy T. Adeliyi. (2023). "Designing A Frugal Inspection Robot for Detecting In-Pipe Leaks in The Oil And Gas Sector." 2023 Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS). IEEE.
- NACE (2020). NACE MR0175: Requisitos para materiales resistentes a la corrosión en la industria petrolera. National Association of Corrosion Engineers.
- Odremán, J. G. (2024). Impresión 3D en la Industria: Un acercamiento a la tecnología y su influencia en la Industria Petrolera. *Universidad, ciencia y tecnología*, 18(73), 166-180.
- Ogai H. y Bhattacharya, B. (2018). "Pipe Inspection Robots for Structural Health and Condition Monitoring," *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*, vol. 89, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1007/978-81-322-3751-8
- Ogai, E. (2018). Oil and gas industry: Safety and environmental concerns. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 36, 1-13.
- OSHA (2020). OSHA 29 CFR 1910.119: Regulación para la prevención de accidentes en la industria petrolera. Occupational Safety and Health Administration.
- Pallares, R. A. (2015). Las nuevas tecnologías que pueden modificar la industria del petróleo y del gas. *Petrotecnia*, 122.

- Paredes, R. (2020). Tipos de mantenimiento aplicados en la industria petrolera venezolana de la Región Occidente. *Revista Ingeniería*, 4(9), 129-142.
- Patel, R. (2022). Innovación en la inspección petrolera: Uso de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. *Journal of Petroleum Engineering*, 23(1), 1-12.
- Patel, V. (2022). Tendencias en la inspección petrolera: Un enfoque en la reducción de costos. *Journal of Petroleum Technology*, 75(1), 1-10.
- Patel, V. (2022). Tendencias en la inspección petrolera: Un enfoque en la sostenibilidad y la responsabilidad social. *Journal of Petroleum Technology*, 75(3), 1-10.
- Pinzón Barriga L. E. y Caiza Quishpe L. A. (2022). La utilización de robótica en la inspección de espacios confinados, *ESCI*, vol. 4, n.º 10, pp. 1-14.
- Pushpalatha, B. A., R. Hemavathi, and A. E. Roopa. (2019). "Detection and measuring distance of crack and object obstacle in pipeline using inspection robot." 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). IEEE.
- Quenta Baltazar, C. J. (2024). Evaluación para aplicar procesos y tecnología para prevención y mitigación de impactos ambientales en la Industria Petrolera en Bolivia (Doctoral dissertation).
- Quintana, Javier Gil. (2023). Educación y comunicación en una sociedad postdigital: Investigación documental y análisis de perspectivas. Ediciones Octaedro.
- Ramírez de Verger y Ösle, F. (2017). Estudio de la "financiarización" del petróleo mediante modelos inferenciales de previsión de precios y el análisis de su impacto en la incertidumbre del mercado a través de reticulados binomiales.

- Ramírez, J., & Osle, J. (2017). La industria petrolera en Colombia: Análisis de su estructura y desempeño. *Revista de Economía y Administración*, 14(2), 157-176.
- Rodriguez, J. (2024). AI-Based Inspection: Techniques and Applications. *Journal of Inspection and Testing*, 17(4), 1-20.
- Rodriguez, J. (2024). Radiographic Testing: A Review of the Current State of the Art. *Journal of Inspection and Testing*, 17(3), 1-20.
- Rodríguez-Martin, J. (2022). Uso de la inteligencia artificial en la inspección petrolera: Un enfoque en la detección de fallos. *Journal of Artificial Intelligence and Machine Learning*, 2(1), 1-15.
- Rosas Romero, L. M. (2019). Estado del arte de técnicas no destructivas para inspección de soldadura en tuberías.
- Saha, S., Mukherjee, D., Lahiri, S. K., & Marathe, P. P. (2018). Development of speed control algorithm for Instrumented Pipeline Inspection Gauge (IPIG) in high-speed liquid petroleum pipelines. In *2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)* (pp. 92-97). IEEE.
- Sanchez, M. (2023). Técnicas de inspección en la industria petrolera: Un enfoque en la inspección electromagnética. *Journal of Energy Resources Technology*, 146(1), 1-15.
- Sanchez, M. (2023). Técnicas de inspección en la industria petrolera: Un enfoque en la inspección de equipos y maquinaria. *Journal of Energy Resources Technology*, 147(1), 1-15.

- Serrani, E. (2023). América Latina y su política petrolera frente a las últimas tendencias internacionales. Perspectivas regionales a partir del análisis de Brasil y Argentina. *Foro Internacional*, 182-213.
- Shi, Guannan, et al. (2022). "Wavelet De-noising Method Analysis of Pipeline Magnetic Flux Leakage In-line Inspection Based on Coefficient of Variation." 2022 International Conference on Automation, Robotics and Computer Engineering (ICARCE). IEEE.
- Shi, Y., Wang, X., & Li, Z. (2022). Risk assessment of oil and gas pipelines using advanced inspection technologies. *Journal of Risk and Uncertainty*, 64(1), 1-20.
- Smith, J. (2022). Visual Inspection: A Guide to Best Practices. *Journal of Nondestructive Testing*, 27(1), 1-8.
- Sossa Arancibia, V. A. (2021). Inspección no destructiva de estructuras mediante georradar: análisis de daños por corrosión y por otras patologías.
- SSINA (2020). Guía para la selección de acero inoxidable en la industria petrolera. *Specialty Steel Industry of North America*.
- Uhlig, H. H. (1971). *Corrosion and corrosion control*. John Wiley & Sons.
- Uribe, Jhon Fredy Quintero. (2023). "Lectura académica: revisión de estudios empíricos y reflexiones teóricas en contextos hispanohablantes." *Areté* 23.1: 31-42.
- Vahdati, N., Wang, X., Shirayayev, O., Rostron, P., & Yap, F. F. (2020). External corrosion detection of oil pipelines using fiber optics. *Sensors*, 20(3), 684.

- Wang, Changxin, et al. (2021). "Numerical simulation of oil and gas pipeline crack detection based on pulsed eddy current testing technology." 2021 4th International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME). IEEE.
- Wang, X. (2022). Análisis de datos en la inspección petrolera: Un enfoque en la minería de datos y la inteligencia artificial. *Journal of Data Science and Engineering*, 4(2), 1-12.
- Wang, X. (2022). Inspection with Drones: Techniques and Applications. *Journal of Inspection and Testing*, 15(5), 1-15.
- Yang, Jin-sheng, et al. (2021). "Development of a 64-channel FPGA-based Scalable High-speed Real-time Data Acquisition and Storage System for Ultrasonic In-line Inspection Tools." IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). IEEE.
- Yu, L., Yang, E., Ren, P., Luo, C., Dobie, G., Gu, D., & Yan, X. (2019, September). Inspection robots in oil and gas industry: a review of current solutions and future trends. In *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Zhao, J. W. Li, J. Zhao, X. yuan, Y. Zhu, and Z. Wang. (2020). "A Novel ACFM Probe with Flexible Sensor Array for Pipe Cracks Inspection," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26904–26910, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971177.