

**MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS
DE POZOS PETROLEROS**

Juan David Delgado Rodríguez

Id. 000231218

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2020

**MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS
DE POZOS PETROLEROS**

**Juan David Delgado Rodríguez
Id. 000231218**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Director del Proyecto
Ing. Omar Pinzón Ardila**

**Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga
Escuela de Ingeniería
Bucaramanga
2020**

Dedicatoria

A mi madre, por ser fuente de inspiración y por apoyarme en cada decisión que he tomado durante toda mi vida.

Agradecimientos

Al Ingeniero Omar Pinzón por su asesoría y tiempo dedicado en el desarrollo de este proyecto de grado. A la Universidad representada en los profesores que me acompañaron en el proceso de preparación como profesional.

A mi familia, que me motivaron en esta etapa de mi vida y me apoyaron en todo momento para llevar esta etapa a feliz término.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
Capítulo 1 Generalidades.....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos del proyecto	5
1.3.1 Objetivo General:.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Marco teórico	6
1.4.1 Tubería de perforación drill pipe	6
1.4.2 Tubería de Revestimiento (CASING).....	6
1.4.3 Tubería de Producción (TUBING)	7
1.4.4 Método de inspección no destructivo	7
1.4.5 Desarrollo tecnológico	7
1.5 Metodología desarrollada en el proyecto.....	8
1.5.1 Fase 1: Revisión de la literatura.....	9
1.5.2 Fase 2: Clasificación de la información.....	10
1.5.3 Fase 3: Propuesta de escenarios	10
1.5.4 Fase 4: Entrega de resultados.....	10
Capítulo 2 Revisión de la literatura	11
2.1 Información obtenida de la literatura gris.....	11
2.2 Información obtenida de a partir de bases de datos científicas.....	13
2.2.1 Términos claves	14
2.2.2 Ecuación de búsqueda:.....	15
2.2.3 Búsqueda en bases de datos científicas.....	15
2.3 Análisis bibliométrico.....	16

	iv
2.3.1 Autores relevantes.....	16
2.3.2 Cantidad de artículos publicados por año	18
2.3.3 Ubicaciones destacadas en publicación científica	19
2.3.4 Instituciones u organizaciones destacadas	20
2.4 Análisis de la información obtenida	22
Capítulo 3 Clasificación de la información	27
3.1 Métodos no destructivos	29
3.1.1 Método de Magnetización.....	29
3.1.2 Método por Radiografía de rayos X o Radiografía Industrial	30
3.1.3 Método de proyección de franjas.....	31
3.1.4 Smart Pipeline Internal Gauge (SPIG).....	32
3.1.5 Método de ultrasonido	33
3.1.6 Ultrasonidos multielementos (PAUT - Phased Array)	35
3.1.7 Ultrasonidos automatizados (AUT - Automated Ultrasonic Testing)	36
3.1.8 Time-Of-Flight Diffraction (TOFD - Time-of-Flight Diffraction).....	37
3.1.9 Ondas guiadas (GW - Guided Wave)	37
3.1.10 Captura de Matriz Completa (FMC - Full matrix capture).....	38
3.1.11 El método de prueba MFL (fuga de flujo magnético)	39
3.1.12 Prueba de líquido penetrante.....	39
3.2 Técnicas no destructivas de inspección	40
3.2.1 Optimización de la detección de anomalías magnéticas con sensor de eje único para la localización de cerdos en áreas de baja latitud	40
3.2.2 Plataforma ultrasónica no destructiva para inspección estructural	41
3.2.3 Sistema de localización y seguimiento inalámbrico para robot en tubería	42
Capítulo 4 Propuesta de escenarios	44
4.1 Criterios de selección.....	44
4.2 Propuesta de escenarios a evaluar.....	46
4.2.1 Escenario 1: Automatización de acciones de inspección a tuberías en pozos petroleros.	47

	v
4.2.2 Escenario 2: Fortalecimiento a las actividades actuales de inspección no destructiva.....	48
4.2.3 Escenario 3: Involución en desarrollo tecnológico.....	49
4.3 Matriz de selección de métodos por escenarios.....	50
4.4 Consideraciones desde el enfoque de la ingeniería electrónica.....	52
Conclusiones y Recomendaciones.....	55
Recomendaciones.....	56
Lista de Referencias.....	57
Vita.....	60

Lista de tablas

Tabla 1. Trabajos relevantes identificados en la literatura gris.	15
Tabla 2. Métodos identificados en la literatura gris.	15
Tabla 3. Conjunto de términos utilizados en la estructuración de la ecuación de búsqueda.	17
Tabla 4. Matriz de criterios asociados a métodos de inspección no destructivos.	45
Tabla 5. Matriz de selección de métodos por escenarios.	52

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Metodología aplicada en el desarrollo del trabajo de investigación.	11
Ilustración 2. Ruta empleada para la búsqueda de información.....	16
Ilustración 3. Clústeres de términos claves asociados con la búsqueda de información.	25
Ilustración 4. Ruta para clasificar la documentación que soporta los resultados de la investigación.	27
Ilustración 5. Fases del método de magnetización.....	29
Ilustración 6. Tecnología que hace uso de emisión de ondas ultrasónicas.	33
Ilustración 7. Imagen del método aplicado.	34
Ilustración 8. Método de líquido penetrante.	39
Ilustración 9. Ciclo Hype – Tendencias en tecnologías emergentes.....	46

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS DE POZOS PETROLEROS

AUTOR(ES): Juan David Delgado Rodríguez

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Ing. Omar Pinzón Ardila

RESUMEN

El presente documento expone los resultados de un proceso de investigación asociado con los métodos no destructivos utilizados en la inspección de tuberías de pozos petroleros, mediante el cual se siguió una ruta de búsqueda, selección, clasificación y análisis de resultados obtenidos de distintas bases de datos tanto de la literatura gris como científicas. Posteriormente, y mediante una metodología de tipo descriptiva se propuso un conjunto de cuatro fases orientadas a realizar una revisión de los resultados obtenidos, para posteriormente identificar los métodos que se ajustaban al objetivo del trabajo y proceder a clasificarlos, de tal forma que mediante la propuesta de un conjunto de escenarios se identificaran las posibilidades que a través de los resultados identificados, la ingeniería electrónica cuenta como mediadora en la propuesta de soluciones tecnológicas para el sector petrolero.

PALABRAS CLAVE:

Métodos no destructivos, Inspección, Pozos petroleros

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: NON-DESTRUCTIVE METHODS USED IN THE INSPECTION OF OIL WELL PIPES

AUTHOR(S): Juan David Delgado Rodríguez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Ing. Omar Pinzón Ardila

ABSTRACT

This document presents the results of a research process associated with the issue of non-destructive methods used in the inspection of oil well pipes, through which a search, selection, classification, and analysis of results obtained from different bases were followed. of data from both gray and scientific literature. Subsequently, and employing a descriptive methodology, a set of four phases was proposed aimed at conducting a review of the results obtained, to later identify the methods that fit the objective of the work and proceed to classify them, in such a way that through the proposal from a set of scenarios, the possibilities that electronic engineering has as a mediator in the proposal of technological solutions for the oil sector will be identified through the identified results.

KEYWORDS:

Method, Non-destructive, Inspection, Oil well pipes, Drill pipes

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

En el presente documento se presentan los resultados de un proceso de investigación relacionado con el tema de MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS DE POZOS PETROLEROS. Es así como se resalta su importancia en la industria petrolera entendiendo que, con los hallazgos obtenidos, se aporta a la generación significativa de valor en términos de las acciones que actualmente se ejecutan en las labores de inspección de tuberías en pozos de petróleo.

Estas acciones se relacionan con métodos que, sustentados en técnicas de inspección, permiten que los profesionales del sector petrolero alcanzan ventajas competitivas con respecto a factores de tipo económico y ambiental.

Finalmente, se precisa mencionar que el documento está organizado en los siguientes capítulos: (i) generalidades relacionadas con el desarrollo de la investigación, (ii) resultados de la revisión de la literatura, (iii) clasificación de la información identificada, y, (iv) la propuesta de escenarios en donde se pueden tener en cuenta los métodos no destructivos para la inspección a tuberías de pozos petroleros. Posteriormente, se presentan las conclusiones y recomendaciones relacionadas con el proceso y los resultados de la investigación.

Capítulo 1

Generalidades

En esta sección se presentan los componentes principales que sustentan el desarrollo de este proyecto de investigación. Entre éstos se encuentran el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación y la metodología que se ha seguido para alcanzar los resultados de este trabajo.

1.1 Planteamiento del problema

El sector petrolero es considerado una de las fuerzas claves en la economía de Colombia, debido a que genera tanto ingresos a la nación, como diferentes posibilidades de empleo en el país llegando a generar en los últimos años aproximadamente, “un promedio de 120.000 empleos, de los cuales el 80 por ciento se centra en empresas proveedoras de bienes y servicios” (Toro, 2018). Es así que, se identifica en las actividades de investigación y desarrollo, una oportunidad de generar procesos de cambio con valor agregado, que contribuyen al crecimiento económico de las regiones (Rosenberg, 1974).

En esta línea económica se destaca el trabajo de *Solow*, quien ha venido demostrando que es justamente la incorporación de los avances en temas de tecnología aplicadas a las organizaciones, los que permiten que se genere un crecimiento económico que impacta no sólo a un individuo sino a los territorios, ya que el capital o la fuerza laboral son los activadores de las industrias y la tecnología se identifica como el componente revitalizador de los procesos y acciones de innovación (Morettini, 2009).

En este sentido, y en vista del impacto que la industria de hidrocarburos genera en la evolución de la economía colombiana (A. Acosta, 2018), se identifica como necesidad para las empresas pertenecientes a este sector, **la identificación de procedimientos claros que basados en el uso de herramientas tecnológicas permitan obtener una mejor eficiencia en las diferentes labores de inspección de tuberías.** Así mismo, se tiene que con la intervención del monitoreo y control en los procedimientos asociados con la perforación

segura de los pozos de petróleo (Sandoval, 2016) se logra mejorar la eficiencia y generar los resultados de extracción esperados.

Con base en lo expuesto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Con qué opciones innovadoras relacionadas con el campo de la electrónica, cuentan los tomadores de decisión a la hora de planificar los procesos de inspección en tuberías de pozos de petróleo, con el fin de mejorar su eficiencia en temas económicos e incluso ambientales?

1.2 Justificación

Partiendo de la necesidad de identificar técnicas soportadas en la creciente ola de tecnologías emergentes orientadas a facilitar la gestión de actividades de inspección de tuberías de perforación en pozos de petróleo (las cuales buscan evitar la generación de altos costos de inversión, pérdidas de grandes cantidades de dinero, y daños a terceros, debido a fallas no corregidas a tiempo), se encuentra que desde la academia se puede aportar mediante la generación de conocimiento orientado a mitigar o satisfacer las diferentes problemáticas con las actividades mencionadas, entre las que se encuentran aquellas de tipo operacional asociadas con la pega de tuberías (Rosero Pozo, 2018), así como aquellas asociadas con contaminación ambiental (Gutierrez, 2014), entre otras. En ese sentido, esta necesidad debe ser visualizada desde diferentes enfoques, entre los que se encuentran las dimensiones económica, ambiental, política y social.

En lo económico, el sector petrolero aporta en gran medida al desarrollo del país, en especial, en aquellas zonas donde se realizan sus actividades de explotación. Con respecto al tema ambiental, una inadecuada labor de campo y procesos de inspección no tan eficientes, podrían generar repercusiones que afectarían el espacio natural, en este caso se podría poner como ejemplo el tema de los derrames de petróleo que, debido a diferentes factores asociados a fallas no corregidas a tiempo, han llegado a producir afectaciones a conjuntos de seres vivos (Avellaneda, 1990).

A nivel de políticas, es indispensable reconocer que son éstas el marco que permite que se genere una alineación de los intereses desde la óptica de todos los actores que forman parte del sistema petrolero en el país, con aquellos que forman parte de otras industrias, e incluso otros países. A nivel social, la generación de empleo, la formalización de actividades comerciales y la generación de ingresos a las regiones del país, permiten que los individuos accedan a un mejor nivel de vida, por consiguiente, se contribuya con la meta que a 2030 tienen muchos países frente al tema de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (PNUD, 2016), donde la reducción de la pobreza se encuentra resaltado como uno de ellos.

Es así, que en términos de contribución de conocimiento en labores de inspección a tuberías de perforación en pozos petroleros se estaría impactando no sólo a empresas que realizan labores de inspección en el tema objeto de estudio en este trabajo, ya que desde una visión sistémica (Wilson, 1993) del sector petrolero se estarían mitigando posibles ocurrencias que por fallas en el funcionamiento de las tuberías en éstos pozos, afectarían a un conjunto de actores sociales, económicos, y ambientales.

De esta forma, es importante reconocer que el alcance de los resultados que se presentan en este trabajo de investigación, buscando aportar en la propuesta de un conjunto de métodos de inspección así como las posibilidades de su aplicación en campo, que permitan soportar la toma de decisiones en la planificación de las tareas de inspección, haciendo uso de métodos no destructivos que permitan obtener el mejor desempeño y eficiencia en la producción de pozos de petróleo, que aplicados a tiempo, dan a conocer aquello que debe ser corregido con el fin de evitar fallas o pérdidas de recursos.

Por consiguiente, se debe comprender que éstos métodos de carácter no destructivo que contribuyen con la realización de labores de inspección a tuberías de perforación en pozos de petróleo en su mayoría emplean herramientas soportadas en dispositivos electrónicos y sistemas de información software, por ejemplo, sensores, cámaras de inspección, entre otros, permitiendo a los profesionales en campo identificar posibles fallas o averías en las

tuberías de perforación, sin generar algún tipo de afectación al medio ambiente, antes de continuar con las siguientes etapas de extracción.

1.3 Objetivos del proyecto

A continuación, se presentan tanto el objetivo general como los objetivos, que han brindado soporte y orientación al desarrollo de este proyecto.

1.3.1 Objetivo General:

Proponer una matriz de criterios de selección con base en la identificación de un conjunto de diferentes técnicas no destructivas que apoyan la inspección a tuberías de perforación en pozos de petróleo, con el fin de contribuir con la generación de una fuente de información para la toma de decisiones asociadas con el aporte al mejoramiento de la eficiencia en los procesos de inspección de tuberías.

1.3.2 Objetivos Específicos

Objetivo 1: Realizar una revisión de la literatura científica sobre métodos no destructivos de inspección a tuberías de perforación en pozos de petróleo.

Objetivo 2: Clasificar las técnicas no destructivas utilizadas en la inspección de tuberías en pozos petroleros, tomando como soporte los resultados de la revisión realizada a la literatura científica

Objetivo 3: Establecer una matriz de criterios de selección de métodos no destructivos de inspección de pozos de petróleo, con el fin de proponer un conjunto de escenarios que podrían facilitar su aplicación práctica.

1.4 Marco teórico

En esta sección se presentan los conceptos claves relacionados con el tema objeto de estudio en la presente investigación, la cual está asociada con la identificación de métodos no destructivos de inspección a tuberías de pozos petroleros, por consiguiente, a la identificación de posibles escenarios que puedan ser adoptados desde la perspectiva de la ingeniería electrónica, en la medida que abre paso a la aparición de tecnologías emergentes.

En ese sentido, es preciso dar a conocer a que se hace referencia cuando se habla de tuberías de pozos de petróleo, destacándose conceptos tales como los presentados a continuación:

1.4.1 Tubería de perforación drill pipe

De acuerdo con Acosta & Salazar (2007) se concibe a la tubería de perforación o drill pipe, como columnas que llegan a alcanzar los 45 pies, que unidas con otras logran satisfacer las longitudes requeridas para lograr llegar al objetivo de la perforación. Así mismo, estos autores mencionan dos aspectos importantes a considerar en la perforación, que de no ser gestionados pueden conducir a las fallas o fugas en tuberías, éstas son:

- Utilizar el fluido de perforación de tal forma que se lubrique la barrena y se conduzca la viruta que genera la perforación, hacia una exposición en la superficie.
- La tensión que se genera en la parte superior de la tubería, cuando se lleva a cabo la ejecución de la perforación.

1.4.2 Tubería de Revestimiento (CASING)

Hace alusión a la tubería que se inserta en el pozo, con el fin de evitar daños en las paredes del pozo, mediante el fortalecimiento a la estructura de este. Dentro de los posibles daños se encuentra el desmoronamiento de las paredes, fugas de agua, fugas de gas, daño en arenas productivas, entre otros (W. Acosta & Salazar, 2007).

1.4.3 Tubería de Producción (TUBING)

Hace referencia a la tubería que se utiliza para llevar el producto de petróleo desde la entrada de la perforación hasta la superficie. Es así que, dependiendo del pozo a tratar, esta tubería puede resultar sencilla o compleja (W. Acosta & Salazar, 2007).

1.4.4 Método de inspección no destructivo

Hace alusión a los procedimientos utilizados para evaluar las superficies de los materiales que, en el caso del presente proyecto, se asocian con tuberías de pozos de petróleo, con el objetivo de identificar anomalías, fallas o discontinuidades en los mismos (W. Acosta & Salazar, 2007).

De acuerdo con lo expuesto por (Sandoval, 2016), éstos métodos pueden ser de diversa naturaleza, como:

- a. Inspección visual. Tiene la limitante asociada con la detección de fallas sólo a nivel superficial.
- b. Líquidos penetrantes. Tiene la limitante asociada con la detección de fallas sólo a nivel superficial.
- c. Partículas magnéticas. Supera la limitante de los dos métodos anteriores, ya que además de identificar fallas superficiales, también permite detectar aquellas que son internas a los materiales.
- d. Electromagnetismo. Supera la limitante de los dos métodos anteriores, ya que además de identificar fallas superficiales, también permite detectar aquellas que son internas a los materiales.

1.4.5 Desarrollo tecnológico

Partiendo del concepto de innovación tecnológica, la cual está orientada a generar productos o servicios nuevos o mejorados, que aporten valor agregado a las distintas

actividades de las organizaciones en los diferentes mercados (Escorsa C & Valls P, 2001; Eustat, 2017), se tiene que esta conlleva a la generación de desarrollos tecnológicos, entendidos como resultados alcanzados en el desarrollo de proyectos de investigación que se generan tanto en las empresas como en las universidades.

En ese sentido, en el marco del presente proyecto, se hace necesario definir este concepto, entendiendo que es una alternativa que puede ser adoptada desde la visión de la ingeniería electrónica, para proponer soluciones a la problemática de inspección no destructiva que se realiza a tuberías en pozos de petróleo.

1.5 Metodología desarrollada en el proyecto

La metodología que, utilizada en el desarrollo de este proyecto de investigación, es de tipo cualitativa, debido a que se ha partido de un proceso de revisión de literatura orientado a generar a nivel narrativo, un acercamiento al estado del arte asociado con los métodos no destructivos para la inspección de tuberías en pozos petroleros.

Por consiguiente, y tomando como base los conceptos de estudio exploratorio que según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2006) se ha tratado de avanzar en la investigación de métodos no destructivos para la inspección de pozos petroleros, tema que de acuerdo con la literatura encontrada, se puede considerar como un problema “poco estudiado”. Así mismo, el marco conceptual está soportado en una visión sistémica asociada con la inspección, partiendo del concepto de sistemas expuesto por (Checkland & Holwell, 1998).

Las acciones ejecutadas se han distribuido en las fases presentadas en el diagrama de la Ilustración 1.



Ilustración 1. Metodología aplicada en el desarrollo del trabajo de investigación. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la Ilustración 1, se precisa dar a conocer que cada una de las fases que han soportado el proceso de investigación, se presentan a continuación:

1.5.1 Fase 1: Revisión de la literatura.

Entendiendo que esta fase está orientada a alcanzar el primer objetivo específico, se han realizado las siguientes acciones:

- Identificación de fuentes bibliográficas, tanto en la literatura gris como en el ámbito científico, que han permitido obtener un conjunto de documentos asociados con el tema objeto de estudio.
- Planteamiento de las ecuaciones de búsqueda a utilizar en la obtención de trabajos publicados en el sector petrolero, los cuales se asocian con el tema objeto de estudio.
- Establecimiento de los criterios de selección de los documentos que se tomaron como referente en la lectura y extracción de información.
- Análisis bibliométrico de los resultados de la búsqueda de información obtenida en bases de datos científicas.

- Extracción de la información relevante para la investigación, a través de la lectura.

1.5.2 Fase 2: Clasificación de la información

De acuerdo con la información obtenida de la fase 1, se han definido los lineamientos que permitieron clasificar la información relevante relacionada con el tema objeto de estudio. En ese sentido, se estableció un conjunto de criterios orientados a proponer un marco conceptual sobre los MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS DE POZOS PETROLEROS.

1.5.3 Fase 3: Propuesta de escenarios

Frente a la propuesta de escenarios, se han establecido un conjunto de aspectos que han soportado el planteamiento de un escenario ideal y otro escenario pesimista, en los que se encuentran como alternativas de adopción para la búsqueda de mejoras e innovación en las actividades de inspección a los pozos petroleros, los métodos no destructivos identificados y clasificados en las fases anteriores.

1.5.4 Fase 4: Entrega de resultados

Como fase final, se ha generado la documentación de los resultados asociados con la revisión de la literatura, la clasificación de información y la propuesta de escenarios, sustentados en la información asociada con métodos no destructivos utilizados en la inspección de tuberías de pozos petroleros.

Capítulo 2

Revisión de la literatura

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante procesos de búsqueda tanto en la literatura gris, entendida como sitios Web y *google scholar*, así como en bases de datos científicas como *Scopus* y *Web of Science*.

2.1 Información obtenida de la literatura gris

Como punto inicial asociado con el desarrollo de este proyecto, se ha realizado una búsqueda de información en la literatura gris, es decir, en sitios Web como *Google Scholar* y noticias de Internet.

En la actividad de búsqueda se han utilizado como estructuras básicas de ecuaciones de búsqueda, las expuestas a continuación:

- Ecuación 1: Métodos no destructivos + inspección + pozos petroleros.
- Ecuación 2: Métodos no destructivos + inspección + pozos de petróleo.

En ese sentido, en la Tabla 1 y la Tabla 2 se da a conocer un listado de trabajos considerados pertinentes a tener en cuenta en la clasificación de la información objeto de estudio.

No	Método	Título del trabajo/noticia	Autores	Fuente
1	Magnetización	Inspección tubular: complemento de una buena perforación de pozos en la industria petrolera.	Nayeli Galván Pineda	Ciudad Universitaria Mexico, D.F
2	Termofusión	Análisis comparativo del comportamiento de la soldadura por termofusión frente a las soldaduras por	Víctor Hugo Toapanta Herrera	Escuela Politécnica Nacional.

No	Método	Título del trabajo/noticia	Autores	Fuente
		adhesión y fricción en tuberías de polietileno (pe) para conducción de gas licuado de petróleo.		
3	Drill Pipe	Optimización de procedimientos de inspección para tubería de perforación drill pipe , tubería de producción tubing y tubería de revestimiento casing de pozos petroleros utilizando ensayos no destructivos.	Wilian Orlando Acosta Freire y Edwin Ronaldo Salazar Balladares	Escuela Politécnica Nacional.
4	Tubing			
5	Casing			
6	Inspección por ultrasonido.	Análisis de técnicas de inspección no destructiva en tubería flexible con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos.	Javier Arciniegas Villamizar, Luz Amparo Quintero y Jaime Meneses Fonseca.	Revista Colombiana de Materiales N5. pp 78-85
7	Inspección Radiográfica (Rayos X)			
8	Reconstrucción digital óptica (Reconstrucción tridimensional mediante proyección de franjas)			
9	SPIG (Smart Pipeline Internal Gauge) y Sensores.	Integridad estructural de tuberías de transporte de hidrocarburos: Panorama actual	Farid Meléndez Pertuz, Jorge González Coneo, Zhoe Comas González, Bernardo Nuñez	Revista Espacios Vol. 38 (Nº 17) Año 2017. Pág. 1

No	Método	Título del trabajo/noticia	Autores	Fuente
			Pérez, Pablo y Viloria Molinares.	

Tabla 1. Trabajos relevantes identificados en la literatura gris. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se da a conocer un conjunto de métodos empleados por empresas de servicios en el sector petrolero.

No	Método	Organización	Fuente de extracción
1	Ultrasonido TFM	Grupo de Ingeniería Inspección e Integridad	https://g3i.com.co/
2	Full matrix capture FMC		
3	Radiografía RX Panel digital		
4	Magnetic particle testing (MT)	Tubodrilling Inspection Company	http://www.tubodrilling.com/
5	Liquid penetrant testing (PT)		
6	Ultrasonic testing (UT)		
7	EMI/Flux leakage examination (EMI)		

Tabla 2. Métodos identificados en la literatura gris. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Información obtenida de a partir de bases de datos científicas

Para el desarrollo de esta actividad de búsqueda en bases de datos científicas, se ha seguido la ruta planteada en la Ilustración 2.



Ilustración 2. Ruta empleada para la búsqueda de información. Fuente: Elaboración propia.

Cada una de las etapas propuestas en la ruta descrita en la Ilustración 2, se detallan a continuación.

2.2.1 Términos claves

Dentro del conjunto de términos claves, para el desarrollo del presente proyecto, se presentan los que se relacionan en la Tabla 3. Estos términos se han identificado a partir de la lectura de documentos encontrados en la literatura gris, y mediante el uso de la herramienta Thesaurus¹, la cual a través de la inserción de términos en inglés, permite obtener un conjunto de sinónimos que pueden ser tomados en consideración para estructurar la ecuación de búsqueda.

No.	Término origen	Términos en inglés	Thesaurus del término origen
1	Métodos no destructivos	Non-destructive + method	non destructive + mechanism; mode; process; technique

¹Herramienta en línea que puede ser consultada en <https://www.thesaurus.com/>.

No.	Término origen	Términos en inglés	Thesaurus del término origen
2	Inspección	Inspection	Checkup; review; supervisión; surveillance; scan
3	Tubos de perforación	Drill Pipe	Drilling Pipe
4	Pozos de petróleo	Oil well	---

Tabla 3. Conjunto de términos utilizados en la estructuración de la ecuación de búsqueda. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Ecuación de búsqueda:

Con base en los términos presentados en la Tabla 3, se estructuro la siguiente ecuación de búsqueda a ejecutar tanto en la base de datos científica Scopus como en la de Web of Science.

Ecuación: *((inspection OR checkup OR review OR supervisión OR surveillance OR scan) AND "Drill* Pipes" AND "Oil well*")*

El total de documentos obtenidos de Scopus ha sido 143, y de Web of Science 4.

2.2.3 Búsqueda en bases de datos científicas

Para seleccionar los resultados obtenidos a partir de la búsqueda de información en la base de datos de Scopus y Web of Science, se ha propuesto el siguiente conjunto de criterios de inclusión y exclusión.

2.2.3.1 Criterios de inclusión

- Documentos asociados con el tema de pozos petroleros.
- Documentos que tienen en cuenta tanto casos de aplicación, como de investigación asociada con la inspección de pozos petroleros.

2.2.3.2 Criterios de exclusión

- Documentos que no se han publicado en fuentes como artículos o documentos de conferencias.
- Documentos publicados en idiomas diferentes al inglés o español.

En ese sentido, los resultados seleccionados tanto para Scopus como para Web of Science son los siguientes:

- Scopus = 114
- Web of Science = 4

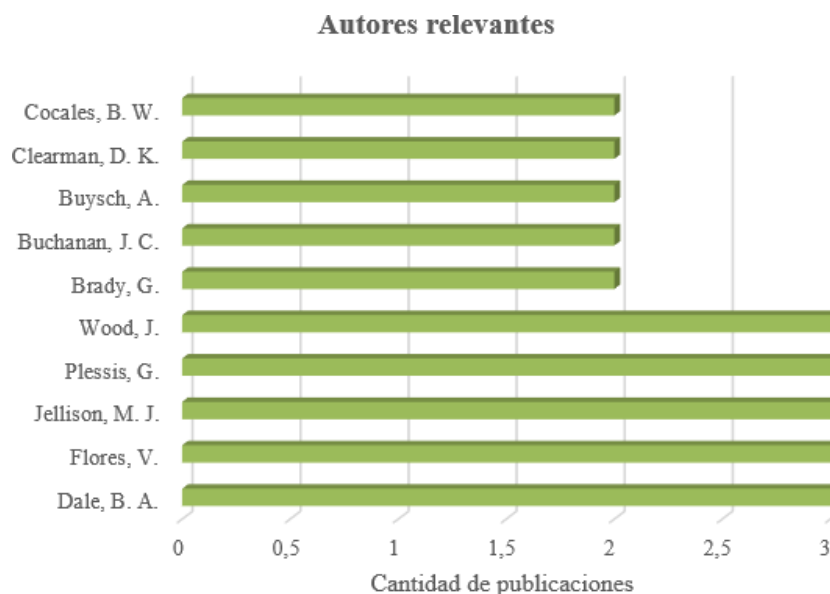
2.3 Análisis bibliométrico

Teniendo en cuenta la cantidad de resultados obtenidos en las bases de datos de Scopus y Web of Science, y entendiendo la significancia de los documentos obtenidos de la primera base de datos científica mencionada, con respecto a la segunda, se propone realizar el análisis bibliométrico a partir de la base de datos de Scopus.

En ese sentido, a continuación, se da a conocer el comportamiento de las publicaciones asociadas con el tema objeto de estudio, mediante los autores más relevantes, cantidad de artículos publicados por año, geografías e instituciones/organizaciones más destacadas.

2.3.1 Autores relevantes

En la Gráfica 1 se presenta el conjunto de autores que se encuentran como relevantes en los resultados obtenidos a partir de la búsqueda de información asociada con métodos no destructivos utilizados en la inspección de tuberías de pozos petroleros.



Gráfica 1. Autores relevantes de la búsqueda. Fuente: Adaptada de *Scopus*.

Teniendo en cuenta la información presentada en la Gráfica 1, a continuación, se da a conocer información de interés relacionada con los principales autores, es decir: Dale, B. A.; Flores, V.; Jellison, M. J.; Plessis, G.; y, Wood, J.

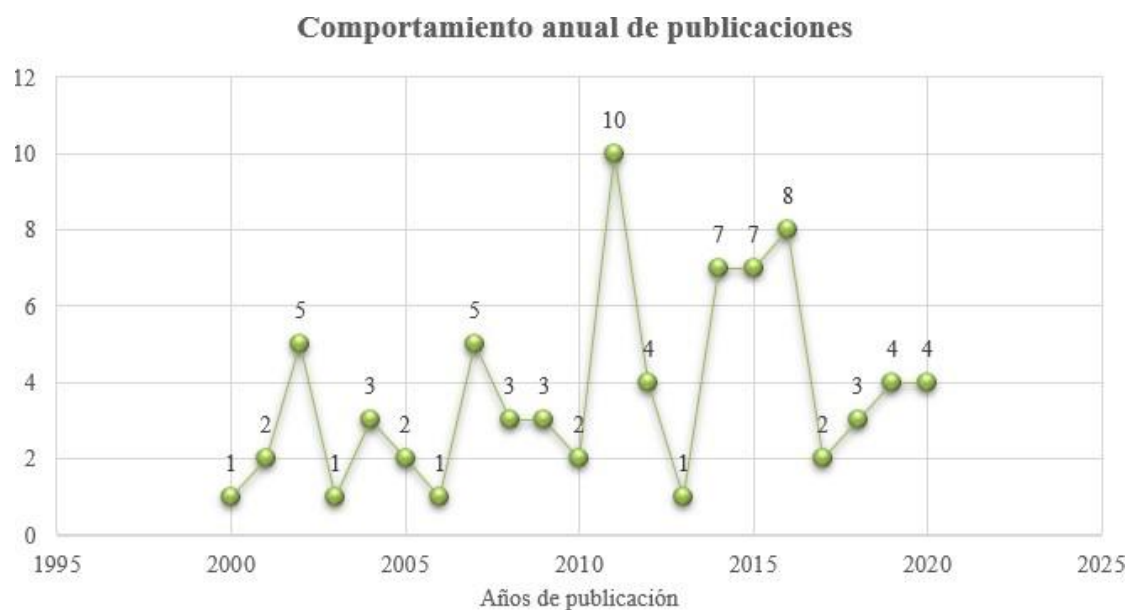
- Dale, Bruce A.: Es un ejecutivo jubilado de ExxonMobil con más de 36 años de experiencia en la industria de Upstream Oil & Gas, realizando labores de exploración, desarrollo y producción. Ha ocupado varios puestos técnicos y de gestión en I + D, soporte técnico y operaciones de campo; defendió tecnologías industriales nuevas y revolucionarias; y fomentó la innovación, la creatividad y la excelencia a lo largo de su carrera profesional.
- Flores, Vincent: En el periodo entre el 2012 y el 2015, Vincent trabajó en la línea de gestión de productos. Lideró el desarrollo de productos y el lanzamiento de productos (Stage Gate Process). Así mismo, era miembro de la Society of Petroleum Engineers (SPE), y fue coordinador del grupo de trabajo de revisión de ISO11961 (Industrias de

petróleo y gas natural - Tubería de perforación de acero). También fue experto designado por el "Bureau de Normalization du Petrole" (AFNOR).

- Jellison, Michael J.: Vicepresidente senior de ingeniería de National Oilwell Varco. National Oilwell Varco (NYSE: NOV) es un líder mundial en el diseño, fabricación y venta de equipos y componentes utilizados en las operaciones de perforación y producción de petróleo y gas, y la prestación de servicios de yacimientos petrolíferos a la industria del petróleo y el gas.
- Plessis, Guillaume: Director de gestión y soporte de productos de Grant Prideco. Dentro del segmento de tecnologías de pozos, Grant Prideco es el fabricante líder de productos para vástagos de perforación.
- Wood, Jeff: Asesor, planificador y estratega Midstream en Chevron. Ha desarrollado actividades tales como ingeniero de operaciones de D&C, ingeniero técnico de perforación para el diseño de pozos, estimaciones de costos, planificación de proyectos / diseño de plataformas y perforación de proyectos importantes en general para optimizar el rendimiento.

2.3.2 Cantidad de artículos publicados por año

En la Gráfica 2 se presenta el comportamiento anual de las publicaciones asociadas con los resultados obtenidos a partir de la búsqueda de información asociada con métodos no destructivos utilizados en la inspección de tuberías de pozos petroleros.



Gráfica 2. Comportamiento anual de publicaciones. Fuente: Adaptada de *Scopus*.

De acuerdo con los datos de la Gráfica 2, se puede identificar que la cantidad de publicaciones que se han generado alrededor de la investigación sobre métodos no destructivos, han sido variantes, es decir, no presentan un comportamiento creciente o decreciente, sino fluctuante.

No obstante, durante las dos últimas décadas, más específicamente en el periodo comprendido entre el 2000 al 2020, se ha previsto que existe al menos una publicación en el año que menos cantidad de ellas presenta, indicando que el interés en el tema ha persistido en el tiempo.

2.3.3 Ubicaciones destacadas en publicación científica

En la Gráfica 3 se presenta el listado de países que se desatacan en cuanto a publicaciones asociadas con el tema objeto de estudio en el presente documento, dentro del conjunto de documentos obtenidos en los resultados a partir de la búsqueda de información.



Gráfica 3. Geografías destacadas en publicaciones. Fuente: Adaptada de *Scopus*.

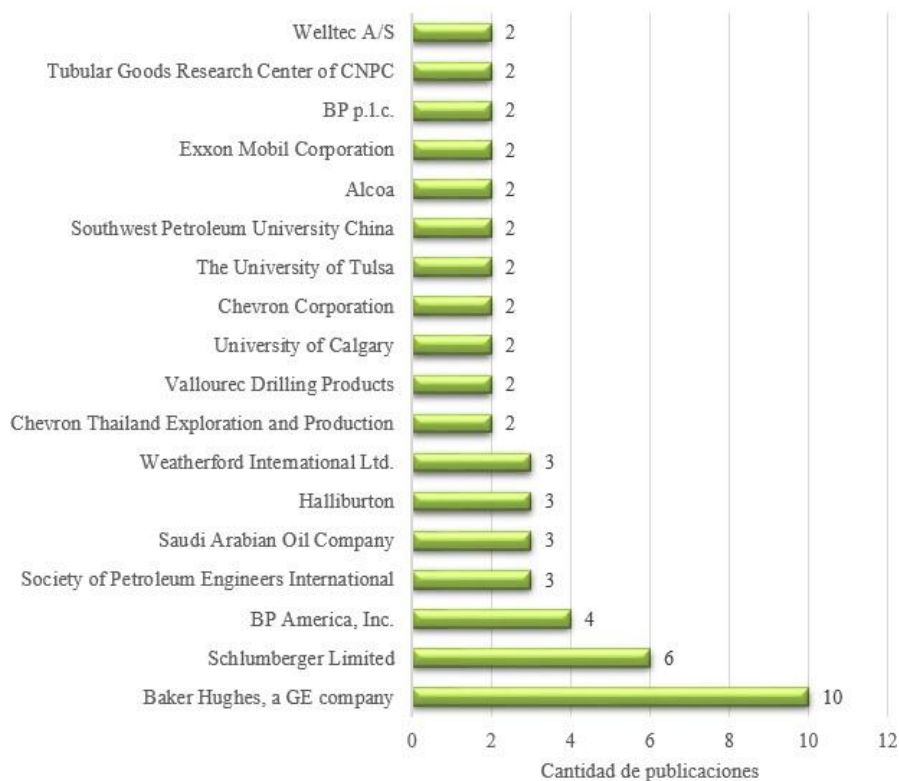
Tal y como se presenta en la Gráfica 3 se destaca la participación de Estados Unidos, como el país más sobresaliente en términos de publicaciones científicas relacionadas con el tema de inspección a pozos petroleros.

Por consiguiente, se propone tener en cuenta esta información a futuro, en caso de inclinarse por la propuesta de una estrategia orientada a la generación de alianzas en investigación con organizaciones e instituciones que desarrollen sus actividades de desarrollo tecnológico en el tema objeto de estudio en este documento.

2.3.4 Instituciones u organizaciones destacadas

En la Gráfica 4 se presentan las instituciones u organizaciones destacadas en los resultados obtenidos a partir de la búsqueda de información asociada con métodos no destructivos utilizados en la inspección de tuberías de pozos petroleros.

Instituciones / Organizaciones destacadas



Gráfica 4. Instituciones / Organizaciones destacadas. Fuente: Adaptada de *Scopus*.

Con base en la información generada a partir de la búsqueda en la base de datos científica *Scopus*, se tiene que las tres principales empresas que cuentan con un alto número de publicaciones relacionadas con el tema objeto de estudio en el presente trabajo, han sido:

- Baker Hughes, a GE Company:

Empresa ubicada en Estados Unidos, presta servicios industriales y al mismo tiempo se considera como una de las organizaciones petroleras más grandes del mundo. Dentro de los servicios en el área de pozos petroleros, se encuentran la perforación, evaluación de formaciones, terminación, producción y consultoría de yacimientos.



Sitio Web: <https://www.bakerhughes.com/>

- Schlumberger Limited:

Es una empresa de petróleos que ofrece servicios y equipo para el trabajo en yacimientos. Su sede principal se encuentra en Estados Unidos, y tiene presencia en países como Francia, Reino Unido, Irlanda, Holanda, Canadá, Noruega, Islas Vírgenes Británicas, Rusia y Alemania.

The logo for Schlumberger, featuring the word "Schlumberger" in a bold, blue, sans-serif font.

Sitio Web: <https://www.slb.com/>

- BP America, Inc.:

Es una empresa que genera y comercializa gas natural al por menor, en todo el mundo.

2.4 Análisis de la información obtenida

De acuerdo con la información resultante de la búsqueda, a continuación, se realiza un análisis de los términos claves que se relacionan con el tema objeto de estudio.

En la Ilustración 3, pueden ser observados los distintos clústeres de palabras claves que más se asocian con los resultados de la búsqueda de información implementada.

De acuerdo con el análisis a los cuatro clústeres, se tiene que los términos pueden ser asociados con respecto a los siguientes temas:

- Clúster 1: Pozo petrolero.

En este clúster aparecen términos asociados con rendimiento hidráulico, tubería de perforación, conexión de tubería de perforación, perforaciones de pozos de petróleo, fatiga de materiales, pruebas de fatiga, rendimiento de perforación, industria de perforación, equipo de campo petrolero, inspección de tuberías, tubería, collares de perforación, tasa de penetración y conexiones con reborde.

- Clúster 2: Perforación y tecnologías.

Sobresalen términos relacionados con perforación de relleno, petróleo en el mar, perforación mar adentro, prevención de explosiones, producción de pozos de petróleo, buen control, oleoductos costa afuera, plataformas de perforación y tecnología offshore.

- Clúster 3: Operación y servicios.

Se identifican términos como equipos de perforación de pozos de petróleo, industria del gas, alcances extendidos, tubería flexible, líneas eléctricas, empresas de servicios, eficiencias operativas, registro de pozos, pozos horizontales, prospección de petróleo y pozos de alcance extendido.

- Clúster 4: Inspección.

En la agrupación de este clúster de términos se encuentran aquellos asociados con grietas, pruebas de pozos, inspección, ingeniería de yacimientos de petróleo, pruebas de seguridad, estándares internacionales, desafíos técnicos y prácticas recomendadas.

Capítulo 3

Clasificación de la información

En esta sección se presentan los lineamientos relacionados con los criterios que han permitido clasificar la información obtenida a través de la búsqueda de documentación en la literatura gris y en las bases de datos de Scopus y Web of Science.

En ese sentido, en la Ilustración 4, se da cuenta de la ruta que se ha aplicado para generar los resultados mencionados.

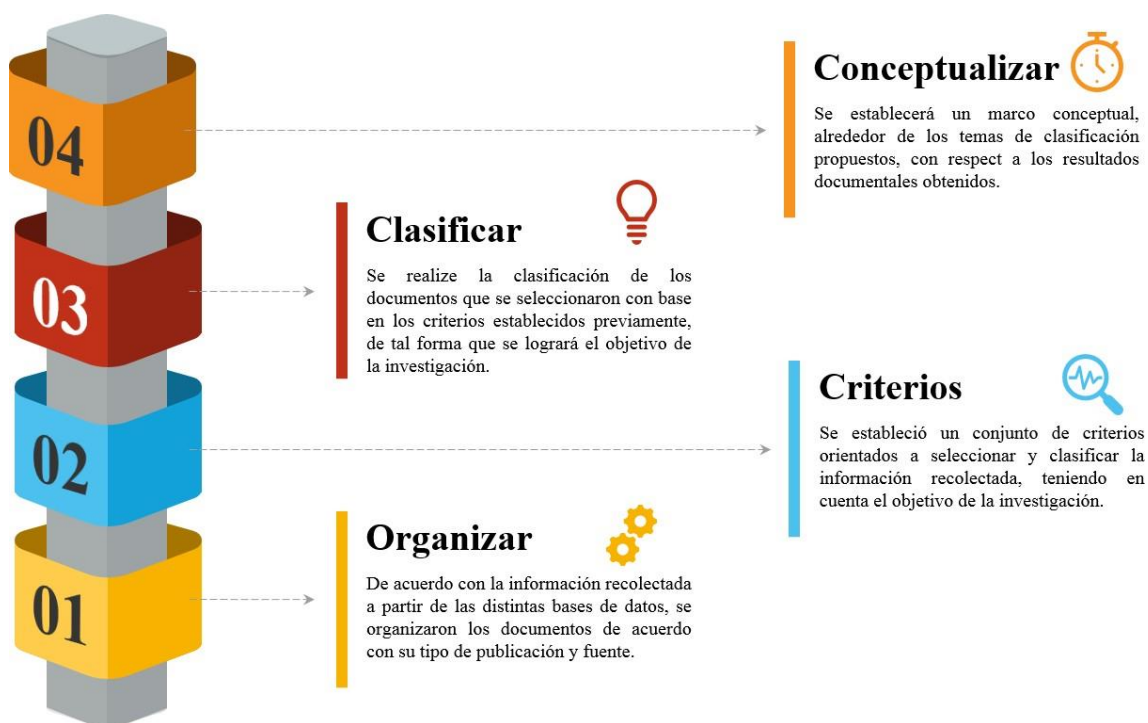


Ilustración 4. Ruta para clasificar la documentación que soporta los resultados de la investigación. Fuente:

Elaboración propia.

Siguiendo la metodología propuesta, a continuación, se presenta en primer lugar un conjunto de métodos no destructivos para inspección de tuberías, y posteriormente un

conjunto de técnicas que desde el área de la ingeniería electrónica pueden apoyar el desarrollo de esta actividad de inspección en pozos petroleros.

De acuerdo con lo anterior, se desarrollaron las siguientes actividades:

En primer lugar, a partir de los resultados de la búsqueda de información realizada, se revisó la información de los documentos, y se propusieron los siguientes criterios de selección de métodos no destructivos para la inspección en tuberías de pozos de petróleo:

- Se toma en consideración trabajos que daban cuenta de la realización de estudios enfocados en el tema.
- Así mismo, se seleccionan métodos que incluyeran tecnología, entendiendo que, desde la perspectiva de la ingeniería electrónica, el desarrollo de herramientas digitales se está abriendo paso, en especial con las tendencias en inteligencia artificial y automatización de actividades en todos los campos productivos.
- Con base en la información encontrada, se realizó una clasificación en métodos y técnicas. Considerando como método a la práctica soportada en fundamentos teóricos y aplicativos, por otro lado, entendiendo a la técnica, como el conjunto de acciones derivadas que pueden ser utilizadas en el marco de la ejecución o implementación de estrategias que hacen uso de los métodos previamente organizados.

Así mismo, se revisan sitios Web enfocados en la documentación y prestación de servicios que usan métodos (también encontrados como ensayos) no destructivos de inspección a tuberías de pozos de petróleo.

Finalmente, y con base en la información evidenciada en los documentos revisados, se procede a conceptualizar cada uno de los métodos y técnicas identificados. Esta información resultante se puede consultar a continuación.

3.1 Métodos no destructivos

Los métodos que a continuación se presentan, han sido identificados tanto en la literatura gris (*Google Scholar*, sitios Web empresariales y noticias) como en resultados generados a partir de la búsqueda en bases de datos científicas.

3.1.1 Método de Magnetización

De acuerdo con (Gavrih, 2020a) este método hace alusión a un procedimiento que busca identificar defectos en la superficie, haciendo uso de la detección de partículas de material ferromagnético que son atraídas por el efecto de imanes.

Este método sólo se aplica en materiales ferromagnéticos y aceros en general. No tiene aplicabilidad en otros tipos de materiales como aluminio, cobre, zinc o aceros inoxidable.

Las fases que se implementan en este método son las presentadas en la Ilustración 5.

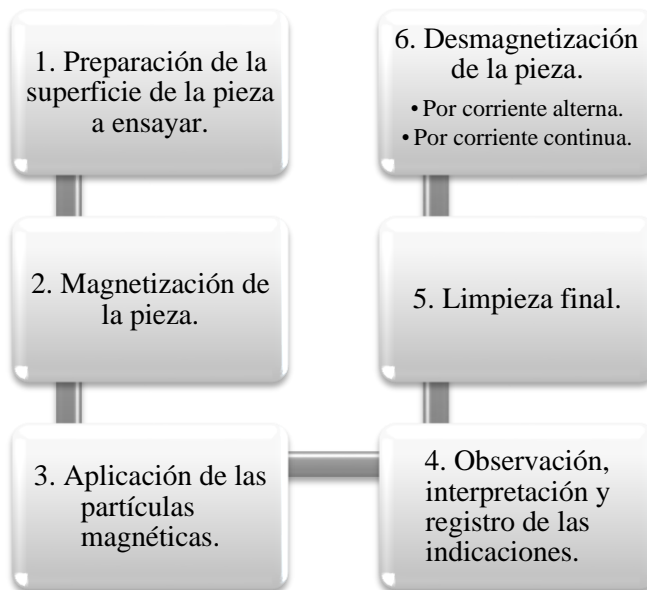


Ilustración 5. Fases del método de magnetización. Fuente: Adaptada de Gavrih (2020a)

Cuando se habla de preparación de la superficie, en la fase 1, se hace alusión a la necesidad de limpiar la pieza de toda suciedad, de tal forma que pueda ser magnetizada en una

segunda fase, donde se identifica si existen líneas de fuga del flujo magnético, en este caso normalmente se aplican corrientes eléctricas continuas, alternas o rectificadas.

Una vez realizado lo anterior, se aplican partículas magnéticas en estado seco o por vía húmeda, buscando que se dispersen de forma uniforme en el aire, es así que de acuerdo a la orientación que tomen, se lograrán detectar los campos de fuga magnéticos. Es así como, posteriormente se observan e interpretan los resultados obtenidos, esta labor la desempeña un experto en el área. Finalmente, se realiza una limpieza a las piezas, y se desmagnetiza mediante uso de corriente alterna o continua.

De acuerdo con W. Acosta & Salazar (2007) algunas de sus ventajas son:

- Es un método rápido y económico, frente a otros métodos.
- En cuanto al mantenimiento de su implementación, requiere menos esfuerzos que otros métodos.

No obstante, dentro de sus limitantes los autores mencionados resaltan que este método sólo es aplicable a materiales ferromagnéticos, sólo detectan anomalías perpendiculares al campo de su aplicación, requiere de energía eléctrica, en campo y de acuerdo con los equipos utilizados puede generar altos costos debido al tiempo de ejecución y es un método que no tiene gran capacidad de penetración en los materiales supervisados.

3.1.2 Método por Radiografía de rayos X o Radiografía Industrial

En este método se utilizan rayos X para identificar fallas en los materiales. En ese sentido el elemento que soporta su implementación se asocia con la radiación y herramientas digitales. Y el indicador de las fallas o problemas en los materiales, se relaciona con la densidad de estos, y sus variaciones. Además, de acuerdo con el tipo de material que se analice, se pueden implementar estrategias de inspección relacionadas con rayos gamma o tubos de rayos X (W. Acosta & Salazar, 2007).

En el procedimiento de análisis y detección, se hacen comparaciones entre las diferentes densidades del material objeto de estudio.

Desde la perspectiva del presente proyecto, se puede proponer la implementación de proyectos soportados en tratamiento digital de imágenes, que, mediante la combinación con algoritmos de aprendizaje por refuerzo o sistemas expertos, permitan a los analistas obtener información más precisa para la toma de decisiones de mitigación o solución a posibles problemas en las tuberías de pozos petroleros.

De acuerdo con W. Acosta & Salazar (2007) algunas de sus ventajas son:

- Puede ser aplicado a materiales metálicos, y algunos fabricados con cerámicas o polímeros.
- Genera datos exactos asociados con la ubicación y el tamaño de la anomalía o falla en la superficie objeto de estudio.

Por otro lado, los autores antes mencionados comentan que es un método costoso en términos de la infraestructura y el personal requerido para llevar a cabo su adopción.

3.1.3 Método de proyección de franjas

En este método según (Oliveros, Mejía, & Mendoza, 2011) se utilizan patrones de franjas captadas por cámara, la cual se proyecta sobre un plano auxiliar y la superficie objeto de estudio. Como factores limitantes, están la distancia que se utilice para la captura de imágenes, y los lentes de formación de imágenes. Estos dos aspectos permiten dar foco y obtener las mejores imágenes. En ese sentido, este método es computarizado y por lo tanto para la selección de las franjas de captura de imágenes, se requiere de la implementación de algoritmos que permitan hacer la selección de las mejores imágenes, incluyendo tratamiento digital de imágenes.

Es así como para lograr el objetivo de hallar las mejores imágenes de inspección, es necesario tener en cuenta “mapas de fase del objeto y el plano de referencia”. De esta forma, a través de algoritmos se procede a generar el dimensionamiento de las imágenes a escala 3D, de tal forma que se puedan identificar fallas o anomalías en las superficies estudiadas.

De acuerdo con el sesgo en los datos y herramientas computacionales utilizadas, este método es de cuidado en cuanto al tratamiento de los datos, y a la inversión generada.

3.1.4 Smart Pipeline Internal Gauge (SPIG)

Meléndez Pertuz, Gonzalez Coneo, Comas Gonzalez, Nuñez Perez, & Viloría Molinares (2017) exponen que hace alusión a una herramienta denominada PIG (que, traducida al español, es “marrano”), que tiene como función recorrer a nivel interno las tuberías de petróleo, haciendo uso de elementos tales como el fluido que transita en ellas.

El PIG cumple dos funciones que son: (i) realizar acciones de limpieza en la tubería, y (ii) identificar fallas o anomalías en la tubería, haciendo uso de su aplicación conocida como SmartPIG, la cual mediante sensores detecta desperfectos geométricos.

Con respecto a los sensores, en la literatura se destacan aquellos de fibra óptica que tienen la “capacidad de medir temperaturas y tensión en distintos puntos a lo largo de una sola fibra”. Así mismo, Ortiz (2015) algunas de las ventajas de este tipo de sensores son las siguientes:

- Alta resistencia a interferencias de señales de tipo electromagnética y de radiofrecuencias.
- Pueden ser utilizados en ambientes agresivos y contaminados.

Finalmente, y haciendo alusión al método aquí expuesto, se tiene que requiere de una inversión reflejada en altos costos, especialmente asociados con la infraestructura y logística.

3.1.5 Método de ultrasonido

De acuerdo con la información manejada por G3i (2019) se tiene que este método se soporta en la aplicación de ondas ultrasónicas para identificar fallas en las estructuras. Un ejemplo de tecnología de este tipo se puede ver en la Ilustración 6.



Ilustración 6. Tecnología que hace uso de emisión de ondas ultrasónicas. Fuente: Tomada de INSERCOR (2020).

Es así como los mismos autores exponen las siguientes dos técnicas:

3.1.5.1 Ultrasonido por Pulso-Eco

Haciendo uso de ondas, y un análisis de su intensidad y tiempos de retardo en la recepción de respuesta que se emite por onda, se establece la posibilidad de fallas. Es así como la estrategia a utilizar en la implementación de esta técnica se soporta en el lanzamiento de pulsos.

Este método generalmente es usado para el tratamiento de espesores, soldaduras, laminaciones y corrosión (Nucleom, n.d.).

3.1.5.2 Ultrasonido por Transmisión

Esta técnica se soporta en la emisión de un haz de ondas de ultrasonido, que debe ser receptado por el lado opuesto de la pieza, desde donde se emitió este.

La forma en la que se identifican las fallas está dada por la intensidad de la transmisión del haz de ondas, en esta técnica no influye el tiempo, y este factor es el que permite diferenciar las dos técnicas de ultrasonido.

Como limitaciones o desventajas a este método, se ha identificado la presencia de otros factores diferentes a fallas, que inciden en los resultados del análisis a las señales recibidas, por ejemplo, el tipo de palpadores de las ondas aplicadas. Además, como factores a considerar, se tiene que es un método costoso en términos de la sofisticación de los equipos requeridos, así como el personal necesario para realizar análisis a los resultados obtenidos (W. Acosta & Salazar, 2007).

De forma general el comportamiento gráfico de este método puede ser observado en la Ilustración 7.

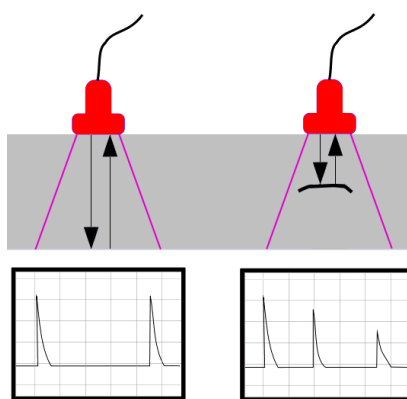


Ilustración 7. Imagen del método aplicado. Fuente: Tomada de EWP (2020).

De acuerdo con EWP (2020) en este método en la imagen de la izquierda se visualiza el envío de la señal haciendo uso de la sonda, de tal forma que tanto la emisión como recepción mantienen un comportamiento esperado, en tanto que la imagen de la derecha muestra cómo se visualiza el comportamiento de la señal, una vez se identifican defectos.

De acuerdo con Nucleom (n.d.), las ventajas que se han identificado en su aplicación, han sido las siguientes:

- Agilidad en la medición del espesor en piezas con dimensiones simples.
- Acceso inmediato a resultados.
- Técnica manejable en términos de la facilidad de su implementación y recursos utilizados.

De acuerdo con W. Acosta & Salazar (2007) otras de sus ventajas son:

- Se identifican anomalías tanto a nivel superficial como subsuperficial.
- Permite acceder a datos de inspección de forma inmediata.
- Con respecto a los resultados asociados con las anomalías detectadas, se puede conocer el tamaño, ubicación y orientación.

3.1.6 Ultrasonidos multielementos (PAUT - Phased Array)

Este método en comparación con el método de ultrasonido tradicional hace uso de una mayor cantidad de elementos como sondas y máquinas que electrónicamente tienen un mayor nivel de tecnología aplicada. Cada elemento utilizado tiene autonomía electrónica, y puede ser controlado de forma independiente o como sistema.

De acuerdo con Nucleom (n.d.), las ventajas que se han identificado en su aplicación, han sido las siguientes:

- Procesos de digitalización que facilitan la cobertura en la zona objeto de estudio.
- Menor incertidumbre en las acciones de inspección a soldadura en tubería.
- Identificación de fallas en términos de volumetría.

- Gestión de datos codificados y almacenados en bases de datos, de tal forma que puedan ser estudiados posteriormente.
- Diferentes panorámicas de las piezas objeto de estudio, en tiempo real.
- Adopción de herramientas software.
- Confirmación en el ejercicio de inspección, debida a la redundancia confirmatoria en la cantidad de estas acciones. Es así que su técnica de inspección es más rápida que otras, en comparación con métodos de ultrasonidos convencionales.
- Realiza tratamiento seguro a datos.
- Se apropia de métodos asociados con 3D y corrientes de Foucault.

3.1.7 Ultrasonidos automatizados (AUT - Automated Ultrasonic Testing)

Hace referencia al uso de un sistema que adopta el uso de elementos aplicados en el método PAUT, además de incluir un sistema de inspección motorizado mediante escáner. En cuanto a desarrollo tecnológico, hace uso de la inteligencia artificial y la robótica. Su aplicación está enfocada en la identificación de fallas en soldaduras siguiendo patrones cartográficos, y en la detección de corrosiones generadas en las tuberías de pozos de petróleo.

De acuerdo con Nucleom (n.d.), las ventajas que se han identificado en su aplicación, han sido las siguientes:

- Precisión en las actividades de inspección, las cuales a su vez se pueden realizar de forma rápida.
- Aplicación de sondas en los procesos de evaluación, que se encuentran acopladas y alineadas constantemente.
- Opción de reforzar el sistema de sondas que se maneja en el método, mediante la adición de cámaras, detectores de humedad, entre otros.
- Posibilidad de gestionar mapas de inspección en las zonas de corrosión objeto de estudio, con precisión.

3.1.8 Time-Of-Flight Diffraction (TOFD - Time-of-Flight Diffraction)

Este método de soporta en la difracción de las ondas que son lanzadas sobre la tubería objeto de estudio, la cual se genera cuando se encuentran obstáculos o fallas en la superficie del objeto.

Para la implementación de este método se hace uso de dos sondas, una emisora y otra receptora, que controlan el envío de la señal de onda. Generalmente se utilizada como complemento al método de ultrasonidos multielementos (PAUT).

De acuerdo con Nucleom (n.d.), las ventajas que se han identificado en su aplicación, han sido las siguientes:

- Precisión.
- Acceso a resultados en tiempo real.
- Altos niveles de sensibilidad en procesos de detección de fallas en la tubería.

3.1.9 Ondas guiadas (GW - Guided Wave)

Es un método que hace uso de sondas para el envío de ondas de baja frecuencia. Se utiliza para detectar fallas causadas por soldaduras o corrosión.

De acuerdo con Nucleom (n.d.), las ventajas que se han identificado en su aplicación, han sido las siguientes:

- Gran alcance en procesos de inspección.
- Acceso a zonas de dificultad geométrica, para realizar inspección.
- Bajos niveles de interrupción en su adopción para la ejecución de acciones de inspección.
- Puede ser utilizado en tuberías con cobertura o recubrimientos.

- No se requieren recursos complementarios o adicionales para realizar la labor de inspección, como por ejemplo los drones. Lo anterior, debido a que se hace uso de ondas guiadas.

3.1.10 Captura de Matriz Completa (FMC - Full matrix capture)

De acuerdo con G3i (2019) & Nucleom (n.d.), este es un método en el que se obtienen datos resultantes de la inspección a tuberías, mediante el uso de sondas ultrasónicas de matriz en fase.

En la matriz mencionada cada uno de sus elementos puede actuar como transmisor en un determinado momento, haciendo que los demás asuman la posición de receptores. En ese sentido, se entiende que la matriz se alimenta de los datos que se van almacenando conforme se van generando señales emitidas del proceso de inspección.

Es preciso mencionar que la obtención de datos y el procesamiento de las señales que conforman la matriz se realiza sobre una zona específica de la tubería del pozo de petróleo. Este método permite la reconstrucción de imágenes, y adopta el enfoque del método de ultrasonido multielementos.

De acuerdo con Nucleom (n.d.), las ventajas que se han identificado en su aplicación, han sido las siguientes:

- Altos niveles de definición, resolución y representación de la zona objeto de estudio asociada con fallas en tuberías, como por ejemplo la corrosión.
- Mejor caracterización de los hallazgos y zonas objeto de estudio, en comparación con otros métodos.
- Reducción de niveles de ruido en la identificación de parámetros asociados con las fallas objeto de estudio.

3.1.11 El método de prueba MFL (fuga de flujo magnético)

Este método hace uso de bobinas de detección y sondas que permiten realizar una inspección a las superficies de las tuberías de pozos petroleros mediante su magnetización, es decir, haciendo uso de partículas magnéticas. Este método usa “un sistema de transmisión, conjunto de magnetización, matriz de sensores, módulo de adquisición y registro de datos” para detectar las fugas de flujos magnéticos (Jinfeng, Yihua, & Xinjun, 2006; Li, 2011).

Adicionalmente, Rincón, Calvo, & Estrada (2015) exponen como ventajas de este método, las siguientes:

- Es un procedimiento sencillo.
- Es portable.
- Es económica.

Con respecto a limitaciones en términos de innovación, se tiene que sigue siendo un método tradicional, que hace uso de bajos niveles de sofisticación tecnológica.

3.1.12 Prueba de líquido penetrante

Este método está orientado a utilizar un tipo especial de solvente que se aplica en las superficies objeto de estudio, dejando ver manchas marcadas sobre las anomalías o defectos de los materiales que se están analizando. Las manchas que se reflejan, identificadas mediante indicaciones de color o luminiscencias, actúan como señaladores de las fallas encontradas en las tuberías de los pozos de petróleo (Gavriš, 2020b; MISTRAS, 2020), ver Ilustración 8.

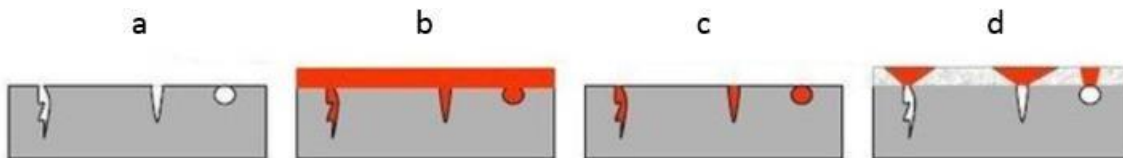


Ilustración 8. Método de líquido penetrante. Fuente: Tomada de Gavriš (2020b).

En la Ilustración 8 se representa el proceso de este método, el cual parte de identificar la superficie objeto de estudio (a), posteriormente se aplica el líquido (solvente) (b), el cual rellena los espacios detectados como anomalías (c) dejando en evidencia las fallas de la superficie, es así que finalmente, una vez detectadas se realiza su marcación y extrae el líquido (d).

Dentro de las ventajas resaltadas por MISTRAS (2020) se encuentran que:

- Es un método fácil de aplicar.
- Puede llegar a fallas muy pequeñas en los materiales, es decir, que es de amplia aplicación.
- Se puede aplicar en diferentes tipos de materiales.
- Puede llegar a geometrías complejas en los materiales.
- Se puede implementar con un bajo costo.

3.2 Técnicas no destructivas de inspección

A continuación, se presenta un conjunto de tecnologías que se han identificado en la literatura científica, como casos de aplicación a diferentes situaciones de inspección no destructiva.

3.2.1 Optimización de la detección de anomalías magnéticas con sensor de eje único para la localización de cerdos en áreas de baja latitud

Según lo expuesto por (Xu, Guo, Liu, Zhang, & Zhou, 2019), esta técnica se aplica por ejemplo cuando un PIG se atasca en su recorrido a través de las tuberías. En este caso, entendiendo que estos “marranos” cuentan con imanes, se establece que por medio de una estrategia de magnetización se identifiquen las anomalías en la tubería. Para esta labor se hace uso de sensores magnéticos y grados de inclinación de acuerdo con el posicionamiento de las tuberías.

Adicionalmente, cuando se trata de ejes, se puede hacer uso de sensores de uno, dos o tres ejes, es decir, de acuerdo con la dimensionalidad de la tubería, vista desde el manejo de uno, dos o tres ejes en el plano cartesiano de análisis, se pueden ejecutar estrategias de inspección. Es así como en la mayoría de los casos se suele recomendar la inspección haciendo uso de tres ejes, entendiendo que de esta forma se pueden cubrir las dimensiones del objeto de estudio.

3.2.2 Plataforma ultrasónica no destructiva para inspección estructural

Esta plataforma hace parte de un trabajo científico publicado por Dobie, Summan, Pierce, Galbraith, & Hayward (2011), en donde se menciona que para la inspección de estructuras (tuberías) en pozos de petróleo, se puede conformar a manera de empaquetado o sistema, tanto el desarrollo hardware evidenciado en la fabricación de pequeños robots que actúan como vehículos de inspección (incluyendo sensores), como la algoritmia que los controla y permite el tratamiento de datos generados de la aplicación de ondas ultrasónicas o campos electromagnéticos, así como de la inspección visual que también transmiten. De igual forma, dentro de su estructura se contempla el uso de comunicaciones de tipo inalámbrico, de tal forma que se favorezca la movilidad de los artefactos robóticos,

Esta técnica, genera eficiencia en términos de la operatividad asociada con el procedimiento de la inspección, especialmente impactando en términos del tiempo empleado en esta labor.

Algunas ventajas que se perciben de esta técnica son las siguientes:

- Según los autores, esta tecnología se puede implementar a bajo costo e incluso desecharse una vez su vida útil llegue a término.
- Se pueden utilizar robots que funcionen mediante la adaptación del método de inspección ultrasónica, sin la necesidad de generar contacto con la superficie.
- Se puede adaptar la tecnología a diferentes ángulos de incidencia.

- Con esta tecnología se puede realizar inspección a grandes áreas de la superficie del objeto de estudio.
- Se pueden manejar las incertidumbres posicionales de los robots.

3.2.3 Sistema de localización y seguimiento inalámbrico para robot en tubería

El sistema presentado en el trabajo de Qi, Ye, Zhang, & Chen (2010) parte de tener en cuenta el desarrollo tecnológico dado en áreas como la localización, el envío de información mediante canales inalámbricos, y el uso de sensores magnéticos acoplados en una matriz. Así mismo se hace uso de campos electromagnéticos, y transferencia de señales. Consecuentemente, se aplican modelos de análisis de datos, soportados en la realización de actividades de simulación que intentan proveer a los tomadores de decisiones de información asociada con tamaños geométricos, parámetros de onda, y frecuencias manejadas en la transferencia de señales.

Esta técnica está orientada a ser implementada en tuberías metálicas subterráneas, debido a la imposibilidad de otras técnicas como de ultrasonido, que no pueden atravesar este tipo de materiales.

Este sistema hace uso de los siguientes componentes:

- Emisor electromagnético de frecuencia extremadamente baja (ELF).
- Matriz de sensores magnéticos sensibles.
- Procesador de señal.
- Sistema de software de seguimiento y localización.

El sistema robótico presenta un comportamiento similar a una serpiente que recorre la tubería, estando cargada de los respectivos artefactos electrónicos, entre los que destacan los sensores magnéticos.

En ese sentido, las fases que conforman a este sistema están enmarcada en la generación de la señal, su transmisión por medio inalámbrico, recepción por el elemento que capta la señal, y su paso a un sistema computarizado para realizar su procesamiento.

Capítulo 4

Propuesta de escenarios

Partiendo del enfoque de inversión en la gestión de pozos petroleros y su mantenimiento, se tiene que algunas de las variables claves que se tratan están relacionadas con recursos de tiempo, dinero, y las ganancias que se pueden percibir a partir de la logística desarrollada alrededor de su explotación (Forbes, 2020). En ese sentido, desde el área de la ingeniería electrónica, y la perspectiva de innovación que actualmente se ha venido desarrollando en los diferentes mercados tecnológicos, se propone matriz de criterios presentada en la Tabla 4, que permiten evaluar el conjunto de métodos identificados en la literatura.

4.1 Criterios de selección

Con base en lo anterior, se tiene que el conjunto de criterios expuestos en la matriz mencionada, se ha propuesto con base en los planteamientos de (Bahadur Ibrahimov, 2016; Saavedra & Jiménez, 2014), orientados a identificar como viable una solución que tecnológicamente, desde la perspectiva de la ingeniería electrónica, puede aportar en la implementación de escenarios apropiados a las problemáticas de inspección no destructiva a pozos de petróleo.

La definición de cada criterio es la siguiente:

- Criterio 1: Ha superado las fases de pruebas en entornos reales, y es funcional con respecto a su aplicación en el mercado (Este criterio se propone con base en los conceptos de los niveles de alistamiento tecnológico (TRL) planteados por Minciencias).

- Criterio 2: Se soporta en el uso de dispositivos hardware y software (Se propone este criterio, entendiendo la naturaleza de las actividades que se desarrollan en proyectos de ingeniería electrónica).

- Criterio 3: Incluye tecnología actualizada, es decir, no hace alusión a métodos pragmáticos o tradicionales que no involucran soluciones soportadas en el desarrollo electrónico (Se propone este criterio, entendiendo la naturaleza de las actividades que se desarrollan en proyectos de ingeniería electrónica, la cual se asocia con software y hardware).
- Criterio 4: En cuanto a rentabilidad, no exige altos costos de inversión (Se establece este criterio, tomando como base el objetivo de rentabilidad que normalmente las organizaciones buscan alcanzar en sus proyectos) (B. Ibrahimov, 2016).

No.	Método	Criterio	Criterio	Criterio	Criterio
		1	2	3	4
1	Método de Magnetización.	X			X
2	Método por Radiografía de rayos X o Radiografía Industrial.	X	X	X	
3	Método de proyección de franjas.	X	X	X	
4	Smart pipeline internal gauge (SPIG).	X	X	X	
5	Método de ultrasonido.	X	X	X	
6	Ultrasonidos multielementos (PAUT - Phased Array).	X	X	X	
7	Ultrasonidos automatizados (AUT - Automated Ultrasonic Testing).	X	X	X	
8	Time-Of-Flight Diffraction (TOFD - Time-of-Flight Diffraction).	X	X	X	
9	Ondas guiadas (GW - Guided Wave).	X	X	X	
10	Captura de Matriz Completa (FMC - Full matrix capture).	X	X	X	
11	El método de prueba MFL (fuga de flujo magnético).	X	X	X	X
12	Prueba de líquido penetrante.	X			X

Tabla 4. Matriz de criterios asociados a métodos de inspección no destructivos. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Propuesta de escenarios a evaluar

Teniendo en cuenta la matriz de criterios de selección planteada anteriormente, se proponen los siguientes tres escenarios, que van desde lo ideal hasta lo no deseado, en términos de la implementación de un proyecto donde se promueva el uso de soluciones tecnológicas soportadas en la ingeniería electrónica. Adicionalmente, se considera la posible adopción de las tendencias tecnológicas presentadas en la Ilustración 9.

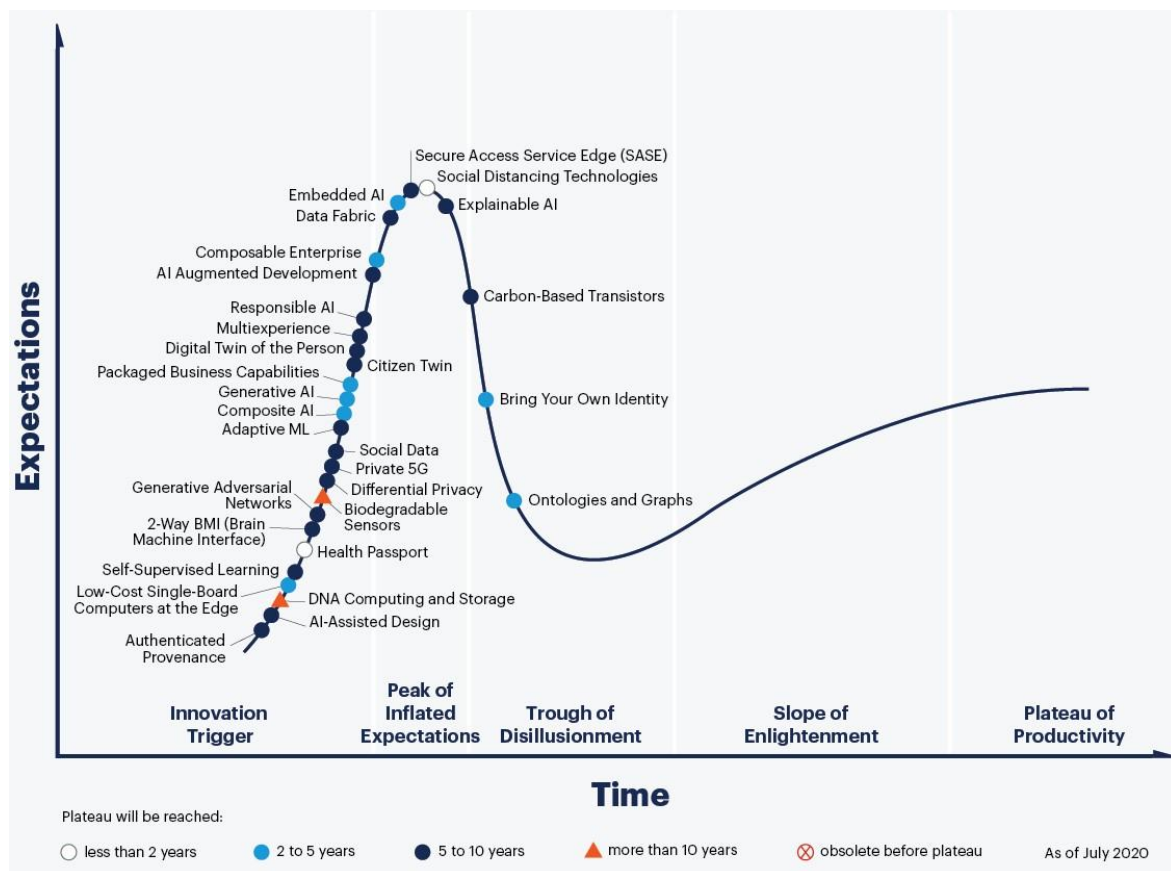


Ilustración 9. Ciclo Hype – Tendencias en tecnologías emergentes. Fuente: Tomada de Gartner (2020)

En la Ilustración 9 se consideran los siguientes puntos a tener en cuenta, para ser incorporados en el marco de los escenarios próximos a proponer:

- Desde el punto de vista organizacional: El desarrollo de soluciones soportadas en tecnologías de información, que fortalecen la infraestructura de comunicaciones y gestión de datos en las empresas a nivel general, promoviendo así el desarrollo de capacidades de TI en la industria.
- Desde el punto de vista de acceso general a datos: Se ven como tecnologías emergentes y en posicionamiento, la adopción de conceptos asociados con el internet de las cosas, las redes privadas 5G, seguridad en el acceso a servicios, e inteligencia artificial embebida en múltiples aplicaciones.
- Desde un enfoque ético en algoritmia: Se procura por el fortalecimiento en el desarrollo de aplicaciones de inteligencia artificial, soportadas en el desarrollo de tecnologías confiables, que aseguran la información, y hacen más ético el desarrollo de esta disciplina.
- Desde el panorama del desarrollo hardware: Se empiezan a posicionar los desarrollos que hacen uso de transistores basados en carbón. Por otro lado, Gartner identifica la posible llegada de sensores biodegradables.
- Desde el panorama del desarrollo software y hardware: Se busca volver más autónomas las aplicaciones de inteligencia artificial que se han venido desarrollando.

4.2.1 Escenario 1: Automatización de acciones de inspección a tuberías en pozos petroleros.

En este primer escenario, se proponen las siguientes condiciones para que se perciba como una situación ideal de funcionamiento, en términos de procesos de inspección a tuberías de pozos petroleros, mediante métodos no destructivos.

- Se está a la par en acciones de adopción de tecnología emergentes, relacionadas con inteligencia artificial. Estas soluciones de desarrollo tecnológico se han previsto que se posicionen en el mercado en un periodo de 2 a 10 años.

- Se crean relaciones entre actores de la cuádruple hélice (gobierno, academia, industria y sociedad civil), enfocadas a desarrollar trabajos colaborativos, enfocados a proponer soluciones frente a las necesidades del sector petrolero, entre las que se encuentra la eficiencia en términos de gastos de inversión para ejecutar proyectos de desarrollo tecnológico.
- Se generan proyectos de automatización soportada en tendencias que adoptan los principios y diferentes áreas que componen a la inteligencia artificial, incluyendo así la acción multidisciplinar de los diferentes campos del saber científico y tecnológico.
- Conforme al avance presentado en el sector, es posible que se decreten leyes o políticas por parte del sector gubernamental, que estén enfocadas en generar inversión en investigación y desarrollo tecnológico en el sector petrolero. Siendo así, también se impactaría en el área de inspección y monitorización de pozos.

4.2.2 Escenario 2: Fortalecimiento a las actividades actuales de inspección no destructiva

Con respecto a las condiciones que se establecen para este escenario, se establecen las siguientes:

- Se proponen innovaciones relacionadas con métodos no destructivos de inspección a tuberías en pozos petroleros, llegando a fusionar algunos de los métodos existentes en la actualidad, con tendencias en desarrollo tecnológico que han estado apareciendo durante los últimos años, por ejemplo, en temas de sensores y transmisores de información incorporados en sensores, de tal forma que se logre fortalecer la mejora de los resultados. Una posibilidad de encuentra en la adaptación incremental de soluciones de inteligencia artificial (en donde se incluyen algoritmos genéticos empotrados en artefactos diseñados en nuevas generaciones de procesadores y hardware, que mediante acciones de entrenamiento pueden identificar fácilmente puntos de falla en tuberías, otro ejemplo de innovación incluiría robots diseñados con material biodegradable enfocados a la detección y posible recuperación de averías en las tuberías).

- En cuanto a temas de atenuación de costos, se sugiere realizar proyectos de investigación donde se busque la generación de materiales para la construcción de agentes robóticos y sensores, de bajo costo.
- Adicionalmente, desde el campo de la ingeniería electrónica, se propone que empresas, universidades y centros de investigación, generen alianzas enfocadas a desarrollar iniciativas que mitiguen las problemáticas del sector petrolero. Un ejemplo de proyecto podría estar orientado en el análisis de la combinación de métodos de inspección no destructiva a tuberías en pozos petroleros, que se manejan de forma tradicional, junto con aquellos métodos que ya adoptan avances innovadores en términos de tratamiento de señales, imágenes e incluso procesamiento de datos, de tal manera que se logren alcanzar nuevas técnicas que adopten no sólo un método sino las ventajas y oportunidades que pueden ofrecer dos o más métodos interconectados.

4.2.3 Escenario 3: Involución en desarrollo tecnológico

Con respecto a este escenario, y considerando la aplicación de criterios en la matriz de análisis de ventajas y limitaciones que presentan los métodos que se han clasificado, se propone que es posible generar un escenario para una organización o sector en general, en el que no se adopten avances en materia de innovación y desarrollo tecnológico, que presente las siguientes situaciones:

- Pérdida de rendimiento e incluso de ventajas competitivas en el mercado de hidrocarburos, asociada con los altos tiempos de dedicación a tareas de inspección a tuberías en pozos de petróleo, por consiguiente, altos niveles de pérdidas económicas por falta de producción, que se pueden asociar con la implementación de métodos de inspección no destructivos anticuados. Esto último se propone tomando como referencia que ya existen en el mercado opciones de automatización de estos procesos, pero aún hoy en día esto representa altos costos de inversión.
- Bajos niveles de efectividad en la detección de anomalías en las superficies y sub-superficies de las tuberías en pozos de petróleo, asociadas con el posible avance en términos de los materiales que son utilizados para la construcción de estas tuberías.

- Promoción de un sector rezagado frente a las exigencias de los clientes y organizaciones que trabajan articulados con el sector petrolero.
- Desentendimiento gubernamental, en términos de inversión para el desarrollo tecnológico e innovación en el sector petrolero (Esto se propone, ya que en la medida en que los sectores demuestran aporte al desarrollo económico territorial, se empiezan a generar convocatorias gubernamentales que intentan fortalecer el sistema de investigación y desarrollo tecnológico en determinadas áreas).

4.3 Matriz de selección de métodos por escenarios

A continuación, en la Tabla 5, y en el marco del presente proyecto, se propone una matriz que permite asociar los métodos conceptualizados, en cada uno de los escenarios propuestos.

Escenario	Método de inspección no destructiva	Comentarios de la selección de métodos para cada escenario
Escenario 1: Automatización de acciones de inspección a tuberías en pozos petroleros.	Método de Magnetización. Método por Radiografía de rayos X o Radiografía Industrial. Método de proyección de franjas. Smart Pipeline Internal Gauge (SPIG). Método de ultrasonido. Ultrasonidos multielementos (PAUT - Phased Array). Ultrasonidos automatizados (AUT - Automated Ultrasonic Testing).	Se seleccionan todos los métodos, ya que al establecer estrategias que permitan generar una combinación efectiva entre dos o más métodos, es posible que se pueda llegar a generar un conjunto de premisas que permitan formular estrategias efectivas (sobre todo de bajo costo) para la automatización completa de todos los procesos de inspección no destructiva en tuberías de pozos de petróleo. En ese sentido, se resaltan los avances logrados haciendo uso del método de

Escenario	Método de inspección no destructiva	Comentarios de la selección de métodos para cada escenario
	<p>Time-Of-Flight Diffraction (TOFD - Time-of-Flight Diffraction).</p> <p>Ondas guiadas (GW - Guided Wave).</p> <p>Captura de Matriz Completa (FMC - Full matrix capture).</p> <p>El método de prueba MFL (fuga de flujo magnético).</p> <p>Prueba de líquido penetrante.</p>	<p>prueba MFL (fuga de flujo magnético), el cual toma principios tradicionales y los adapta al uso de tecnologías como sensores, llegando a resaltar el bajo costo de su aplicación.</p>
<p>Escenario 2: Fortalecimiento a las actividades actuales de inspección no destructiva.</p>	<p>Método por Radiografía de rayos X o Radiografía Industrial.</p> <p>Método de proyección de franjas.</p> <p>Smart Pipeline Internal Gauge (SPIG).</p> <p>Método de ultrasonido.</p> <p>Ultrasonidos multielementos (PAUT - Phased Array).</p> <p>Ultrasonidos automatizados (AUT - Automated Ultrasonic Testing).</p> <p>Time-Of-Flight Diffraction (TOFD - Time-of-Flight Diffraction).</p> <p>Ondas guiadas (GW - Guided Wave).</p> <p>Captura de Matriz Completa (FMC - Full matrix capture).</p>	<p>Son métodos que de ser más investigados por las organizaciones, las universidades y en general los centros de investigación y desarrollo tecnológico, pueden llegar a mitigar las limitaciones en términos de los costos de inversión y el capital humano experimentado que son requeridos para llegar a ser implementados sin restricciones.</p>

Escenario	Método de inspección no destructiva	Comentarios de la selección de métodos para cada escenario
	El método de prueba MFL (fuga de flujo magnético).	
Escenario 3: Involución en desarrollo tecnológico.	Método de Magnetización. Prueba de líquido penetrante.	Involucra métodos que aún siguen siendo utilizados de forma tradicional en las acciones de inspección a tuberías en pozos de petróleo.

Tabla 5. Matriz de selección de métodos por escenarios. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Consideraciones desde el enfoque de la ingeniería electrónica

De acuerdo con la información presentada en las anteriores secciones, desde el punto de vista de la ingeniería electrónica y su aplicación a soluciones orientadas a facilitar la implementación de métodos no destructivos para la inspección a tuberías de pozos de petróleo, se propone como ruta de acción para alcanzar un escenario ideal, superando las actuales condiciones de los escenarios realistas y no deseados, al siguiente conjunto de acciones:

Acción 1: Identificar fenómenos o necesidades en la labor de inspección a tuberías de pozos de petróleo.

Esta acción está orientada a generar soluciones tecnológicas que realicen constantemente un escaneo de la situación actual de las tuberías de pozos petroleros, en donde se arrojen datos de fallas en tiempo real, de tal forma que se puedan generar acciones correctivas y de mejora, que eviten pérdidas económicas a las organizaciones.

De acuerdo con los resultados de esta acción, se prevé la necesidad de gestionar nuevos proyectos o fortalecer los desarrollos tecnológicos ya existentes.

Acción 2: Evaluar soluciones tecnológicas a la vanguardia

De acuerdo con las necesidades detectadas en la acción 1, y conforme con el análisis de presupuesto disponible para invertir en desarrollo tecnológico, se deberá identificar: (i) si existen soluciones en el mercado, que además de ser innovadoras, generan rentabilidad a la organización; o (ii) si es posible ejecutar proyectos de investigación, desarrollo e innovación desde la misma organización, en los cuales se busque alcanzar mayores niveles de rendimiento en las actividades de inspección. En este sentido, cuando se habla de desarrollo tecnológico, se hace alusión a los resultados de investigación o ejecución de proyectos, donde se involucra tanto hardware como software, e iniciativas que van a la par con las tendencias del desarrollo de los mercados.

Estas iniciativas mencionadas, hacen alusión a la implementación de aplicaciones relacionadas con inteligencia artificial, en donde la robótica, los sistemas expertos, los algoritmos genéticos, y sistemas soportados en aprendizaje por refuerzo, pueden contribuir a la generación de tecnologías que electrónicamente construidas, actuarían como herramientas que almacenarían información la cual con base en procesos de análisis soportados en algoritmia, abrirían paso al desarrollo de acciones de acuerdo con el caso a solucionar, que para efectos de este proyecto estaría asociado con la identificación de fallas en pozos de petróleo.

Acción 3: Análisis de resultados obtenidos de las acciones 1 y 2.

Una vez implementadas las acciones 1 y 2 se propone a las organizaciones generar estrategias que propongan la ruta de implementación de soluciones tecnológicas, en donde iniciativas de tipo multidisciplinar relacionadas con la adopción de tendencias tecnológicas y desarrollo de nuevas alternativas de hardware y software, permitan a las organizaciones realizar de forma efectiva sus actividades de inspección a tuberías en pozos petroleros.

Finalmente, se establece que en este documento se da razón de los métodos y tendencias tecnológicas, pero así mismo, es posible que desde el campo de la ingeniería electrónica, se puedan generar nuevas soluciones relacionadas con la invención de sensores, materiales inteligentes e incluso procesadores o elementos electrónicos de comunicación y almacenamiento de datos, de bajo costo de inversión, que aporte e impacte a las labores de inspección mencionadas en términos de innovación y rendimiento.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

A través de la realización de este proyecto sobre los métodos de inspección no destructivos a tuberías de pozos de petróleo se deja claro que las técnicas convencionales que parten de la observación, aún conservan sus principios de manejo de datos inclusive innovando en la adopción de sistemas informáticos, permitiendo extraer información, ya sea a manera de imagen o por cuantificación dada a partir de los resultados de que son transferidos entre sensores que actúan como emisores y receptores de información en las superficies internas o externas de las tuberías objeto de estudio.

Conforme a las tendencias tecnológicas que ya han empezado a adoptar los mercados y las instituciones que realizan investigación se encuentra que se están realizando actividades multidisciplinares entre diferentes áreas de la ingeniería, como la ingeniería electrónica, la ingeniería de petróleos y la ingeniería de sistemas, con el propósito de generar herramientas eficientes, y en especial de bajo costo, como la solución denominada *Plataforma ultrasónica no destructiva para inspección estructural* en la que su adopción permite realizar trabajos de inspección con artefactos fabricados a bajo costo (que pueden llegar a ser desechados).

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, se entiende que el sector de petróleos presenta, de manera constante, oportunidades de desarrollo a nivel tecnológico. Para el caso de estudio en el presente proyecto, las innovaciones que se generen no son la excepción, ya que la infraestructura hacia la cual tienden las actividades de inspección no destructiva a tuberías en pozos de petróleo e incorporan en gran medida el desarrollo de trabajos automatizados, reflejados en las iniciativas de inteligencia artificial, sistemas expertos, y en general en el desarrollo de dispositivos inteligentes.

Frente a la anterior conclusión, también es necesario resaltar que los actuales desarrollos tecnológicos que adoptan sistemas sofisticados de hardware y software aún siguen siendo costosos de implementar. Por lo tanto, se puede concluir que es necesario que las organizaciones y la academia, generen alternativas de proyectos que busquen generar una tecnología a bajo costo, pero con elevados niveles de rendimiento y efectividad.

Recomendaciones

Se propone que, a nivel de estudios de posgrado, se desarrollen prototipos orientados a aplicar uno o varios métodos de los mencionados, tomando como referencia los avances que en términos de innovación en el campo de la automatización se han venido implementando. De esta manera, en proyectos desarrollados por fases, se puede contribuir al alcance de escenarios ideales de automatización para el sector petrolero (en especial en actividades de inspección no destructiva), en un término del mediano o largo plazo.

Es importante que, desde la ingeniería electrónica, se forme a futuros profesionales en temas que de forma multidisciplinar (generando alianzas con otras áreas como las ingenierías de sistemas, mecánica, industrial, de materiales y también de diseño industrial), logren proponer alternativas de solución a diversas problemáticas en los distintos sectores productivos. Para el caso del presente proyecto, dicho conjunto de alternativas de solución, además de incidir en actividades de inspección no destructivas, también podría extenderse a control de fluidos, manejo de desechos, determinación de vida útil de los materiales con los que se construyen las tuberías, detección de factores externos que afectan la vida útil de las tuberías, reconocimiento de posibles fallas in situ durante los procesos de soldadura, entre otros.

Lista de Referencias

- Acosta, A. (2018). *La dependencia del petróleo*. Retrieved from <https://www.larepublica.co/analisis/amytkar-d-acosta-m-557896/la-dependencia-del-petroleo-2792214>
- Acosta, W., & Salazar, E. (2007). *Optimización de procedimientos de inspección para tubería de perforación (Drill Pipe), tubería de producción (Tubing) y tubería de revestimiento (Casing) de pozos petroleros utilizando ensayos no destructivos*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/751/1/CD-1160.pdf>
- Checkland, P., & Holwell, S. (1998). *Information, Systems and Information Systems: Making Sense of the Field*.
- Dobie, G., Summan, R., Pierce, S. G., Galbraith, W., & Hayward, G. (2011). A noncontact ultrasonic platform for structural inspection. *IEEE Sensors Journal*, 11(10), 2458–2468.
- Escorsa C, P., & Valls P, J. (2001). *Tecnología e innovación en la empresa. Dirección y gestión*. México: Alfaomega grupo editor.
- Eustat. (2017). Innovación tecnológica (Hasta EIT-2017). Retrieved from https://www.eustat.eus/documentos/opt_0/tema_217/elem_3017/definicion.html
- EWP. (2020). Ultrasonic Testing. Retrieved from http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html
- Forbes. (2020). *ACP: empresas petroleras en Colombia operan a pérdida*.
- G3i. (2019). Ultrasonido TFM (Total Focusing Method). Retrieved from <https://g3i.com.co/index.php/productos-y-servicios/inspeccion-y-ensayos-no-destructivos/ultrasonido-tfm>
- Gartner. (2020). Hype Cycle 2020, ¿qué hay de nuevo?
- Gavrish, A. (2020a). Magnetic-particle testing (MT). Retrieved from <https://www.tuv-nord.com/lv/en/services/testing/non-destructive-testing-of-materials-and-structures-ndt/magnetic-particle-testing-mt/>
- Gavrish, A. (2020b). Penetrant Testing (PT). Retrieved from <https://www.tuv-nord.com/lv/en/services/testing/non-destructive-testing-of-materials-and-structures->

ndt/penetrant-testing-pt/

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación*.
- Ibrahimov, B. (2016). A new approach to in-pipe locomotion, “QuestionMe” technique increasing open innovation efficiency in petroleum robotics. In *In 2016 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7736288/>
- Ibrahimov, Bahadur. (2016). Development of a Decision Making Guide for Locomotion Design for In-pipe Inspection Robots - One Step towards Open Innovation in Robotics. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.106>
- INSERCOR. (2020). Ultrasonido Total Focusing Method (TFM). Retrieved from <https://www.insercor.com/portfolio/ultrasonido-total-focusing-method-tfm/>
- Jinfeng, D., Yihua, K., & Xinjun, W. (2006). Tubing thread inspection by magnetic flux leakage. *NDT & E International*, 39(1), 53–56.
- Li, Y. (2011). *Development of a Robot-based Magnetic Flux Leakage Inspection System*. Universität des Saarlandes.
- Meléndez Pertuz, F. A., Gonzalez Coneo, J. E., Comas Gonzalez, Z. V., Nuñez Perez, B. E., & Vitoria Molinarez, P. (2017). Integridad estructural de tuberías de transporte de hidrocarburos: Panorama actual. *Revista Espacios*. Retrieved from [https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/4599/Integridad estructural de tuberías de transporte de hidrocarburos. Panorama actual.pdf?sequence=1](https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/4599/Integridad%20estructural%20de%20tuberias%20de%20transporte%20de%20hidrocarburos.%20Panorama%20actual.pdf?sequence=1)
- MISTRAS. (2020). SERVICIOS DE INSPECCIÓN DE PRUEBAS PENETRANTES (PT). Retrieved from <https://www.mistrasgroup.com/how-we-help/field-inspections/traditional-ndt/penetrant-testing/>
- Morettini, M. (2009). *El modelo de crecimiento de Solow*. Retrieved from <http://nulan.mdp.edu.ar/1854/1/01466.pdf>
- Nucleom. (n.d.). Soluciones END - Ultrasonidos multielementos (PAUT). Retrieved from <https://nucleom.ca/es/soluciones-end/ultrasonidos/>
- Oliveros, D. M. Q., Mejía, R. V., & Mendoza, E. Y. (2011). Reconstrucción tridimensional de deformaciones mecánicas superficiales en platinas, basada en la proyección de

- franjas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 59, 169–180. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/430/43021205016.pdf>
- Ortiz, J. (2015). *Sensor óptico de nivel de líquidos*. AC. Centro de Investigaciones en Óptica. Retrieved from <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/802/1/19982.pdf>
- Qi, H., Ye, J., Zhang, X., & Chen, H. (2010). Wireless tracking and locating system for in-pipe robot. *Sensors and Actuators A: Physical*, 159(1), 117–125.
- Rincón, S., Calvo, D., & Estrada, E. (2015). Técnica de partículas magnéticas: caso del laboratorio del CAMAN. *Ciencia y Poder Aéreo*, 10(1), 59–70. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5682840.pdf>
- Rosenberg, N. (1974). Science, Invention and Economic Growth. *The Economic Journal*, 84(333).
- Saavedra, N., & Jiménez, F. (2014). Necesidades de Innovación y Tecnología para la industria de petróleo y gas en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 0(40), 50–56. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i40.660>
- Sandoval, J. (2016). *Procedimiento para la Planificación de la Certificación API Nivel III de la Torre de Perforación. Caso: Aplicación en Campo Huyapari, Edo*. Retrieved from <https://tauniversity.org/sites/default/files/journal-repository/articulo-jose-sandoval-journal-aprobado.pdf>
- Toro, M. (2018). *La economía colombiana se mueve al ritmo del petróleo*. Retrieved from <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/hidrocarburos-son-el-futuro/articulo/la-economia-colombiana-se-mueve-al-ritmo-del-petroleo/590813>
- Xu, W., Guo, Z., Liu, Z., Zhang, P., & Zhou, Y. (2019). Optimization of magnetic anomaly detection with single-axis sensor for pig locating in low latitude areas. *Petroleum*, 5(4), 417–423.

Vita

Juan David Delgado Rodríguez, oriundo de la ciudad de Bucaramanga. Actualmente estudiante optante por el título de ingeniero electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Con experiencia de trabajo en el sector petrolero, alcanzada mediante una práctica laboral realizada durante el año 2019.