# PLANEACION Y PROGRAMACION DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO: NORMATIVAS Y APLICABILIDADES EN LA INDUSTRIA PETROLERA

DAMID DE JESUS DE LA TORRE MENDOZA

DIRECTOR:

GUILLERMO LEONARDO VARGAS BELLO

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS – SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

ESPECIALIZACIÓN EN GENERENCIA DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

TUNJA

2025

## Dedicatoria

A Dios, fuente de mi fortaleza y de cada una de mis esperanzas. Gracias por sostenerme cuando las fuerzas flaquearon, por abrir caminos donde no los veía y por recordarme que todo propósito bajo Tu voluntad es posible. Este logro es, ante todo, tuyo. A mi amada prometida, Karen Andrea Pacheco Álvarez, cuyo amor ha sido un refugio en mis días difíciles y un impulso en mis días de duda. Gracias por tu paciencia, tus palabras de aliento, tu compañía silenciosa en mis jornadas de estudio y por creer en mí incluso cuando yo mismo titubeé, este sueño también lo construimos juntos.

A mis queridos padres, Donaldo Damid de la Torre Zarante y Carmen Teresa Mendoza Pérez. No existen palabras suficientes para agradecerles la vida, los valores y el esfuerzo incansable con el que me formaron. Cada sacrificio, cada consejo y cada gesto de amor se convierten hoy en la base de este logro, ustedes son mi mayor orgullo y mi más grande inspiración. A ustedes, que han sido luz, fuerza y motivo, les dedico con el corazón este peldaño más en mi camino profesional y en el cumplimiento de mis sueños.

## Contenido

1. Introducción ..... 4

2. Justificación ..... 6

3. Objetivos ..... 8

4. Marco teórico ..... 9

5. Metodología ..... 19

6. Planeación y programación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana ..... 23

7. Normativa que fundamenta el mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana ..... 29

8. Aplicabilidades del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana a partir de la revisión documental ..... 37

9. Análisis ..... 44

10. Conclusiones ..... 47

11. Recomendaciones ..... 49

Referencias bibliográficas ..... 50

# 1. Introducción

Hoy por hoy gracias a la expansión del sector industrial se han desarrollado tecnologías y diferentes métodos que han aumentado la calidad de la recolección y análisis de datos, especialmente en la industria petrolera, por ello, la automatización de procesos y optimización de operaciones externas e internas se concentran ampliamente en lo que se conoce como mantenimiento predictivo, el cual extrae información crucial y valiosa por medio de un proceso de diagnóstico de equipos y/o activos asociados a las islas petroleras que permite identificar fallas y mejora la toma de decisiones frente a las necesidades de los recursos materiales, humanos y económicos (Infante Gómez, 2023). Este tipo de mantenimientos se fundamenta en un alto nivel de confiabilidad y eficacia, por lo que en la industria petrolera que presenta enormes riesgos tanto para las inversiones como para la zona geográfica y ecológica donde se encuentra, es crucial y casi que indispensable contar con la utilización de este. Su funcionamiento se basa en el diagnostico de activos (equipos-maquinas) por medio de técnicas de análisis específicas que facilitan la revisión de las condiciones de los mencionados, lo que lleva a determinar las situaciones futuras que pueden suceder con dichos equipos y tomar las mejores decisiones, respectivamente (Andino Vásquez, 2025).

De esta manera, en la presente monografía se estructura un estudio de análisis que parte de la necesidad de abordar el mantenimiento predictivo en la industria petrolera desde la planeación y programación. Bajo la dirección de la necesidad que existe para profundizar en los aspectos funcionales, técnicos y normativos del mantenimiento se guía la realización del estudio, haciendo uso de una metodología cualitativa con un diseño de revisión documental o bibliográfica mediante las bases de datos de Redalyc y Scholar Google, con la definición de criterios de inclusión se desarrollaron tres capítulos principales que se sustentan en el marco teórico, el primero alude a la descripción de la planeación y programación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana, en el segundo de identifica la normativa que fundamenta el mantenimiento predictivo en la industria

petrolera colombiana, y, en el tercero se detallan las aplicabilidades del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana. Lo que dio paso a la profundización preferencial del marco normativo colombiano y su ausencia en el fundamento de la implementación del mantenimiento predictivo en el sector industrial, lo que refleja la existencia de un vacío legislativo, pero que se puede sopesar con el uso de las normas técnicas internacionales ISO.

Todo lo anterior con el propósito de analizar los procesos de planeación y programación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana teniendo en cuenta la normatividad y sus aplicabilidades.

## 2. Justificación

Hoy en día la globalización, la tecnología y el crecimiento socioeconómico ha permitido que la sociedad y/o las personas como las organizaciones o industrias se encuentren expuestos a procesos de evolución y adaptación de acuerdo a las demandas del medio. Es por esto que actualmente las compañías, sobre todo las macroempresas se dan en la tarea de seguir avanzando y creciendo, una de ellas se ubica en el sector petrolero, el cual tiene acogida de forma mundial desde hace muchísimos años, haciendo uso del recurso del petróleo derivado de los restos fósiles sedimentados para la creación y diseño de diferentes productos que se comercializan y distribuyen ampliamente. Este sector se contempla desde una perspectiva que puede llegar a ser peligrosa debido a su poca orientación hacia la responsabilidad social y la contaminación ambiental, sin embargo, el panorama puede llegar a ser alentador si se cuenta con procedimientos puntuales que mitiguen el impacto en la sostenibilidad.

No obstante, la relevancia de este trabajo se focaliza especialmente en la profundización de un tema bastante complejo, pero que requiere de ser estudiado y analizado de manera detallada, con el propósito de proporcionar información confiable y certera de los procesos de planeación y programación del mantenimiento predictivo como una estrategia significativa que permite el adecuado funcionamiento de los sistemas y máquinas en las industrias petroleras, teniendo en cuenta aspectos cruciales dentro de esta, como lo son la normatividad que la fundamenta y las aplicabilidades de los procesos mencionados, respectivamente. Lo anterior es crucial, debido a que como tal en Colombia no existe un marco normativo establecido o definido que regule de manera directa el mantenimiento predictivo, sino que arbitrariamente se conocen normas internacionales y de seguridad que detallan y/o puntualizan información de suma importancia para la prevención de riesgos acotados a las maquinarias industriales.

Por consiguiente, este trabajo también se presenta como un generador de conocimientos actualizados que procura al mismo tiempo la revisión de

documentación que va a posibilitar en gran medida analizar lo que es el mantenimiento predictivo como un método tecnológico que garantiza eficacia y rapidez en la identificación de modelos de fallas, programación de reparaciones, adecuación del proceso de producción, disminución de costos de inversión o costos innecesarios de utilidad. Sumado a esto, la monografía se consolida como un aporte a la comunidad científica y petrolera como una referencia bibliográfica que ha de ser útil para futuros estudios o procesos de indagación que se deseen realizar en este campo, especialmente en el reconocimiento puntual y explícito de las normas que rodean el sistema de funcionamiento del mantenimiento predictivo.

# 3. Objetivos

## Objetivo general

Analizar los procesos de planeación y programación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana teniendo en cuenta la normatividad y sus aplicabilidades, una revisión documental

## Objetivos específicos

- Describir la planeación y programación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana
- Clasificar la normativa que fundamenta el mantenimiento predictivo en la industria petrolera desde una perspectiva nacional e internacional
- Detallar las aplicabilidades del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana a partir de la revisión documental

# 4. Marco teórico

## 4.1 Industria petrolera en Colombia

La industria del petróleo es uno de los muchos sectores del país que mueve la economía y que se caracteriza ampliamente por ejecutar acciones que van desde la exploración de terrenos o espacios en donde se pueda encontrar el insumo con el fin de poder extraerlo, conllevando a procesos más complejos como su refinación, producción y otros que tiene como fin último la consolidación de productos como combustibles, plásticos y otros (Bonifaz et al., 2020).

Frente a lo anterior la Agencia Nacional de Hidrocarburos expone que Colombia es un país con recursos bastante significativos y provechosos que suponen la tenencia de un futuro potencial para la industria a nivel nacional, teniendo en cuenta que se consolida como una de las principales fuentes de activos externas, llegando a representar hasta el 32% de las exportaciones colombianas, reflejando su alto nivel de compromiso con este sector dadas las fuertes asociaciones que se tienen con la inversión extranjera y la producción por medio de compañías sofisticadas y diversificadas (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2025).

Desde la perspectiva de Betancourt Campusano (2023) la industria del petróleo en Colombia ha atravesado muchos cambios o atentados que de cierta manera le dejaron en su momento sin opciones frente a las asociaciones con agentes externos debido a los procesos de explotación del recurso en el territorio nacional, lo que repercutió en problemas relacionados a la oficialización del mismo en el contexto nacional, suscitando el fenómeno de alejar drásticamente la participación del capital privado en este campo, lo cual se podría entender como una opción bastante relevante que proporcionaría un nuevo panorama frente a lo que concierne la negociación y el establecimiento de aspectos que den cuenta el no favoritismo que se puede malinterpretar a partir de los contexto legislativo y hasta ejecutivo. De esta manera, el autor señala como la inclusión del sector privado en la industria petrolera puede traer consigo muchos más beneficios para este, sobre

todo en los escenarios de concertación para la creación de alianzas con empresas extranjeras y su actuación en el campo colombiano.

## 4.2 Planeación y programación en la industria petrolera

Inicialmente, el proceso de planeación petrolera o de planificación de un proyecto petrolero requiere la estructuración y organización de etapas o fases bien definidas que den paso al éxito (EALDE Business School, 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, también es crucial hacer énfasis en la planeación como un elemento indispensable de la responsabilidad social, considerando que este enfoque propende por la sostenibilidad y el desempeño sostenible de carácter institucional, lo que se fundamenta en las adecuadas prácticas de producción, las cuales deben ser amigables con el medio ambiente (Gutiérrez Quiñonez et al., 2014).

## 4.3 Etapas de la planeación petrolera

### *4.3.1 Extracción del petróleo*

La cadena de hidrocarburos se abre paso con la exploración y la explotación como sus primeras actividades principales, donde se tienen que ubicar los yacimientos del petróleo, teniendo la certeza de que realmente hay pozos de petróleo que permitan su excavación, lo cual implica el análisis de la tierra y estudios sísmicos que posibiliten o confirmen que se pueda proseguir a la obtención del líquido (EALDE Business School, 2020).

### *4.3.2 Fase de perforación*

En esta fase se organiza la perforación de los conocidos pozos o agujeros en las zonas ubicadas donde se encuentra el petróleo, haciendo uso de maquinaria especifica como taladros especiales para este tipo de funciones con la finalidad de

conseguir una operación de perforación completa y sin inconvenientes; no obstante, no solo se trata de acceder al petróleo, sino que se deben contar con una infraestructura que permita la salida del líquido, lo cual puede ser tanto en superficie terrestre como en marítima (EALDE Business School, 2020). Estas estructuras metálicas pueden llegar a medir hasta 90 metros y se consolidan en forma vertical para que guíen la salida del petróleo (EALDE Business School, 2020).

### *4.3.3 Producción y procesamiento del petróleo*

En esta siguiente etapa se prosigue con la extracción del petróleo, una vez las perforaciones comprueben con seguridad que en la locación hay presencia del recurso; de manera que, para llevar a cabo este proceso se hace requerido que se cuente con la adecuación y revestimiento de estructuras tipo tubería por donde viajara el líquido hasta llegar a la superficie, así con el acceso a los yacimientos los hidrocarburos pueden fluir con normalidad y seguridad (EALDE Business School, 2020).

### *4.3.4 Refinación del petróleo*

De modo que como el petróleo no puede ser distribuido en su forma original, entra en un proceso de refinamiento, el cual permitirá en gran medida que este sea convertido, procesado y transformado en diferentes productos, como el aceite combustible, la gasolina, asfalto, caucho sintético, variedad de productos químicos, plásticos, disolventes, lubricantes, pegamentos y otros. Esta es una de las fases más significativas y cruciales del proceso, debido a que conlleva a uno de los fines respecto al uso del petróleo en la sociedad (EALDE Business School, 2020).

### *4.3.5 Transporte y almacenamiento del petróleo*

En este proceso el transporte es indispensable, debido a que las zonas comunes de perforación del petróleo suelen estar en lugares apartados, por lo que

es de mucha importancia que los proyectos cuentan con rutas de distribución y transporte que puedan trasladar los diferentes productos a los lugares de consumo, en lo que se debe tener en cuenta la inversión que se hace, teniendo presente que dicho transporte se puede realizar por medio de oleoductos o buques, por ello se hace referencia a que la industria petrolera es ampliamente compleja (EALDE Business School, 2020).

### *4.3.6 Distribución y almacenamiento del petróleo*

Una vez el petróleo se convierte y procesa en productos definidos o específicos, como los mencionados en el apartado anterior, se continua con un proceso de comercialización de los mismos, es decir, todo lo que comprende marketing por medio de empresas consolidadas que venden y ofertan la variedad de productos, ya sea desde grandes, medianas o pequeñas compañías; sin embargo, se ha tener en cuenta que existe un mercado establecido para el almacenamiento del petróleo denominado contango o mercado de futuros, como una estrategia planteada por las organizaciones para aprovechar los bajos precios y esperar en el tiempo el aumento de los mismos (EALDE Business School, 2020).

## 4.4 Maquinaria y equipos esenciales en la industria petrolera

### *4.4.1 Máquinas y equipos para el proceso de perforación*

Los principales equipos que son indispensables en los procesos de exploración y perforación son las plataformas de perforación y las torres de perforación en tierra. Las primeras se caracterizan por ser una estructura que se encuentra ubicada en alta mar con la finalidad de llevar a cabo procesos de perforación de pozos petroleros en el lecho marino, las cuales pueden ser de dos tipos, fijas o móviles y/o flotantes, siendo estas sumamente importantes en el proceso de extracción (J-ROHI Ingeniería S.A.S., 2016). De acuerdo con Sterling Thermal Technology (2024) este tipo de plataformas son generalmente muy grandes y su relevancia en la economía mundial es crucial, no solo abastecen o satisfacen

la demanda mundial de petróleo y gas, sino que permiten el equilibrio económico mediante la extracción cruda de estos materiales. Actualmente, existen 6 plataformas en el mundo que son las más grandes e importantes, empezando con la de Berkut del Pacífico en la costa rusa, cuyo aproximado de extracción es de 4,5 millones de toneladas cada año; seguido por Petronio en el Golfo de México con un estimado de extracción diaria de 60.000 barriles y 3.100.000 metros cúbicos de petróleo y gas natural; la plataforma Perdido que también se ubica en el Golfo de México extrae 100.000 barriles de petróleo cada día; Hibernia que se encuentra localizada en el océano Atlántico Norte cuenta con una capacidad de 1.400 barriles por día; Olympus en el Golfo de México produce 100.000 barriles diarios, y, finalmente, Gullfaks en el Mar del Norte con una capacidad estimada por día de 605.965 barriles (Sterling Thermal Technology, 2024).

Seguidamente, las torres de perforación en tierra son un tipo de maquinaria que se emplea para la perforación de la tierra con el fin de alcanzar los pozos de petróleo, así como de hidrocarburos, para lo cual es muy relevante estudiar y analizar con detalle las condiciones geográficas y geológicas de la zona explorada (J-ROHI Ingeniería S.A.S., 2016). El proceso se abre paso con la exploración y la penetración de las capas de roca y sedimentación que existen en la tierra, y así la construcción tenga acceso a los yacimientos de crudo, habiendo identificado las fuentes de petróleo y gas de manera subterránea, demostrando que también el proceso conlleva un enorme riesgo en el contexto laboral, cuyas actividades constantes demandan seguridad y recursos (Acurio Masabanda, 2025).

### *4.4.2 Máquinas y equipos para el proceso de extracción y producción*

En los procesos de extracción y producción son requeridos dos equipos: a) las bombas de extracción: son aquellas que permiten que el petróleo se eleve desde los pozos donde se encuentra hasta la superficie, existen diferentes tipos de bombas, como las de pistón, las de cavidad progresiva y otras; y, b) los separadores: se emplean principalmente en el proceso de separación del petróleo, el gas y el agua, teniendo en cuenta que todo ello se extrae de forma conjunta, de esta manera

estos equipos son los encargados de tratar y distribuir individualmente los productos mencionados (J-ROHI Ingeniería S.A.S., 2016).

Debido a los desafíos que desde sus inicios la industria petrolera demando con el paso de los años se han desarrollado nuevas tecnologías que posibiliten la mejora del proceso de extracción y producción del crudo, surgiendo así, nuevas tecnologías como las bombas y separadores que facilitan el acceso al petróleo, gas e hidrocarburos, dejando a un lado métodos convencionales que suman energía y desgastan el sistema industrial (Afuera, 2021).

### *4.4.3 Máquinas y equipos para el proceso de tratamiento y transporte*

En cuanto al proceso de tratamiento del petróleo se hace necesario la tenencia de torres de destilación, siendo aquellas que posibilitan la separación de los componentes del crudo a partir de sus diferentes puntos de ebullición, es decir, el proceso de ebullición da paso a la adquisición de derivados como la gasolina, el diese y el queroseno; también son importantes los reactores de craqueo, dado que son los encargados de descomponer los hidrocarburos y sus moléculas con el propósito de obtener compuestos ligeros y sumamente importantes, como el caso del gas y otros líquidos petroquímicos (Oruna, 2012).

Para el transporte son requeridos oleoductos y gasoductos constituidos como una red de tubos por los que es transportado tanto el petróleo crudo como el gas natural y son llevados desde un punto a otro para que a término de su llegada puedan ser refinados y distribuidos (J-ROHI Ingeniería S.A.S., 2016). Este tipo de construcciones necesitan un sistema de seguridad que sea infalible, debido a las numerosas fallas que se podrían presentar y ocasionar grandes daños, por lo que hoy por hoy los estándares técnicos frente a las operaciones de las industrias petroleras deben garantizar y mantener la integridad o capacidad instalada y gestión de riesgos ante fugas o deficiencia del enjambre de oleoductos y gasoductos (Tufiño et al., 2020).

### 4.5 Mantenimiento predictivo

En la industria actual la revolución y automatización de muchos procesos dejo en evidencia la necesidad de integrar ciertos sistemas a procesos de mantenimiento industrial, como es el caso del mantenimiento predictivo que se presenta como una estrategia que no solo pretende la revisión de equipos, sino que surge como una necesidad frente a los procesos de mantenimiento, prevención y corrección con la finalidad de disminuir significativamente costos en los métodos que se suelen utilizar y que se basa ampliamente en dos aspectos cruciales, es decir, se suscitan como un elemento clave de la fábrica, cuya construcción adecuada a mediano y largo plazo tienen impactos en los recursos como ningún otro tipo de mantenimiento, partiendo de parámetros funcionales a partir de indicadores de estado de los equipos y el seguimiento y vigilancia constante, lo que se ejecutan de manera puntual y óptima para identificar fallas en los sistemas y de esa manera propiciar acciones que garanticen el adecuado funcionamiento de los equipos, conservando la vida utilitaria y su evolución, no obstante, es indispensable contar con toda la información posible para la planificación de tareas complejas (Molina Salgado et al., 2024).

Conforme lo mencionado anteriormente, es indispensable tener en cuenta que el proceso de implementación del mantenimiento predictivo radica en la ubicación de la variable que permite la identificación como la correlación de elementos de la máquina que son medibles en base a técnicas estadísticas definidas (Saldivia, 2013). El proceso es de suma importancia teniendo en cuenta que al momento en el que se presenta una falla en una máquina no solo repercute en el normal mantenimiento del sistema en su totalidad, sino también en la pérdida de la inversión de la empresa, sobre todo las grandes compañías, de modo que, el mantenimiento predictivo se convierte en una opción viable para prevenir errores o complicaciones en el funcionamiento de la maquinaria (Saldivia, 2013).

Desde la perspectiva de Paredes (2020) la concepción de mantenimiento ha venido cambiando significativamente, teniendo en cuenta que en el presente no solo se aprecia como una actividad de carácter reactiva, sino que más bien se consolida

y determina como un proceso proactivo, lo que significa que paso de ser a algo definido a un más allá en donde se piensa en la eficacia a partir de pasos anticipados que proyectan los imprevistos que pueden llegar a ser muy costosos para las compañías. De esta manera, el mantenimiento predictivo paso de ser una tarea a ejecutar a ser un elemento dentro de la estructura empresarial que visiona los objetivos estratégicos de la misma.

Por otra parte, el funcionamiento del mantenimiento predictivo se fundamenta en tres aspectos: a) sensores y dispositivos conectados: este tipo de elementos se instalan directamente en las máquinas permitiendo que transmitan datos en tiempo real y con confiabilidad acerca de su estado actual, propiciando análisis interactivos; b) soluciones de software y almacenamiento en la nube: este requiere la aplicación de la minería de datos con el propósito de recopilar y analizar todos los datos obtenidos del sistema principal; y, c) modelos predictivos: este tipo de modelos se alimentan de todos los datos que son compilados, se procesan y analizan por medio de aplicaciones tecnológicas basadas en aprendizaje automático que no solo genera patrones informativos, sino que establece comparaciones y posibles fallas antes de la ocurrencia de la misma para reparar y garantizar la continua implementación de la máquina (Saldivia, 2013).

## 4.6 Técnicas en el mantenimiento predictivo

Para que el mantenimiento predictivo tenga un adecuado funcionamiento y garantice su utilidad en el tiempo es indispensable que se cuente con diferentes técnicas que lo permitan, como el análisis de vibraciones, la termografía, el análisis por ultrasonido y el análisis de aceite (Olarte, Arbeláez & Zabaleta, 2010).

### *4.6.1 Análisis de vibraciones*

De acuerdo con Olarte, Botero & Cañón (2010) una de las técnicas más implementadas en el mantenimiento predictivo es el análisis de vibraciones, dado que es crucial no llegar a la destrucción de la máquina, sino preservarla, pero

mediante un proceso de predicción, reparación y/o cambio de piezas cuando esto sea necesario. Así, el análisis de vibraciones se utiliza como un sistema de identificación del estado actual de cada uno de los componentes o partes de la maquinaria, permitiendo así que se consoliden las diversas intervenciones en los momentos necesarios para optimizar aún más el funcionamiento del aparato y su productividad (Olarte, Botero & Cañón, 2010).

Este tipo de técnica se implementa en las máquinas de tipo rotativas y que realizan sus estudios por medio de la manifestación de sus vibraciones, es decir, los comportamientos o tendencias que estas presenten, lo que sugiere la presencia o existencia de niveles normales o adecuados de vibración, sin embargo, cuando no es así se identifican anomalías que alteran el comportamiento adecuado de dicha vibración y alertando una acción de seguimiento y revisión (Olarte, Arbeláez & Zabaleta, 2010).

### *4.6.2 Termografía*

Esta técnica se define como el procedimiento de seguimiento constante de las medidas de temperatura que tienen las máquinas y así establecer si su funcionamiento es óptimo, de esta manera, se focaliza la energía de ondas electromagnéticas que son emitidas y precisar el grado de temperatura que presenta cada máquina, lo que se logra con sistemas específicos que detectan dicha energía que no es visible para el ojo humano, como cámaras termográficas (Olarte, Arbeláez & Zabaleta, 2010).

### *4.6.3 Análisis por ultrasonido*

En esta técnica se hace énfasis en las ondas de sonido que son prorrumpidas por las máquinas, especialmente si se está presentando algún tipo de falla, tal como sucede en la termografía el oído humano no es capaz de detectar el cambio o la modificación Hertz del sonido, por lo que se han de utilizar instrumentos especializados denominados medidores de ultrasonido o detectores ultrasónicos

que arrojan en un monitor el comportamiento de las ondas y posibilita la identificación de fricción, fallas, fugas, pérdidas vacío, arco eléctrico y el estado de las juntas de recintos estancos (Olarte, Arbeláez & Zabaleta, 2010).

### *4.6.4 Análisis de aceite*

En el caso de los aceites son indispensables para poder conocer en gran medida el estado físico y químico derivados de las máquinas, siendo de mucha importancia para el cuidado desgaste, la temperatura y las impurezas que pueda tener el equipo, de modo que, cuando se revisan las condiciones en las que se encuentran dichos aceites lubricantes se logran determinar datos de contaminación y degradación, lo que a su vez da paso a definir si la máquina está cumpliendo no con sus funciones o el nivel de falla que tenga la misma (Olarte, Arbeláez & Zabaleta, 2010). La contaminación requiere la cuantificación de partículas metálicas desgatadas, combustibles, agua, materias carbonosas e insolubles; mientras que la degradación alberga las propiedades de viscosidad, detergencia, basicidad y constante dieléctrica (Olarte, Arbeláez & Zabaleta, 2010).

# 5. Metodología

## 5.1 Enfoque de investigación

El presente trabajo, se encuentra enmarcado dentro de un paradigma interpretativo, con enfoque cualitativo, el cual se caracteriza por hacer énfasis en los aspectos vivenciales o abiertos, basándose en ambientes naturales donde se desarrollan los fenómenos, a partir de los cuales se analizan e interpretan los datos o significados de lo que se encontró, a diferencia del enfoque cuantitativo, este no hace uso de elementos numéricos de tipo estadísticos (Hernández Sampieri et al., 2014).

## 5.2 Diseño de investigación

Este trabajo se maneja desde un diseño de investigación de revisión documental o bibliográfica que se define como un proceso de búsqueda informativa por medio de diferentes técnicas de análisis que permiten la evaluación de un tema específico, con la finalidad de construir conocimientos a partir de lo ya conocido o establecido, así como de asegurar procesos de mejora continua y profundización en los análisis que den cuenta los datos que se publican o exponen mediante otras investigaciones o estudios (Acosta Faneite, 2023).

## 5.3 Proceso investigativo

El estudio se consolido durante los meses de agosto y septiembre de 2025, donde se realizó una búsqueda de los documentos necesarios. Gestionándose electrónicamente en bases de datos que manejan revistas científicas tanto nacionales como internacionales: Redalyc y Scholar Google. Los términos utilizados a la hora de realizar la búsqueda del material fueron: “planeación petrolera”, “mantenimiento predictivo”, “maquinaria en el mantenimiento predictivo”, “manejo de proyectos petroleros, “normas asociadas al mantenimiento predictivo”. La

búsqueda en las bases de datos mencionadas arrojó un sin número de documentos. Sin embargo, para el caso de estado del arte, se seleccionaron 180 artículos, donde 100 acertaron los criterios de inclusión, teniendo en cuenta el área de estudio (ver Tabla 1.).

Los criterios de inserción para, la elección de los artículos se basó en los siguientes puntos:

- Documentos publicados en un intervalo de tiempo entre 2015 y 2025
- Artículos investigativos o de revisión teórica
- Estar publicados en revistas científicas nacionales o internacionales
- Fuentes informativas y artículos de origen internacional y nacional con énfasis en el contexto nacional
- Tener una perspectiva desde la ingeniería e industria petrolera

**Tabla 1.**

*Clasificación de base de datos*

| Base de datos | Palabras clave | Artículos encontrados | Artículos seleccionados |
|---|---|---|---|
| Redalyc | Planeación petrolera; mantenimiento predictivo; maquinaria en el mantenimiento predictivo | 861 | 50 |
| Google académico | Manejo de proyectos petroleros; normas asociadas | 13.200 | 50 |

| |
|---|
| al mantenimiento predictivo |

En la gráfica 1 se muestra la cantidad de artículos publicados por año desde 2017 a 2025, teniendo así que los años con mayor cantidad de investigaciones o trabajos científicos son 2017, 2021 y 2023 y en el presente año a diferencia de los anteriores los números bajaron, aunque no tan significativamente. Por otra parte, en el Gráfico 2 se evidencian los diferentes orígenes de dichos documentos, la mayoría de ellos latinoamericanos y una minoría europeos y estadounidenses, lo que significa que en países como México, Colombia, Argentina, Ecuador y otros se refleja una predominancia de producción científica alrededor del tema del mantenimiento predictivo y la planeación.

**Gráfico 1.** *Artículos publicados por año*

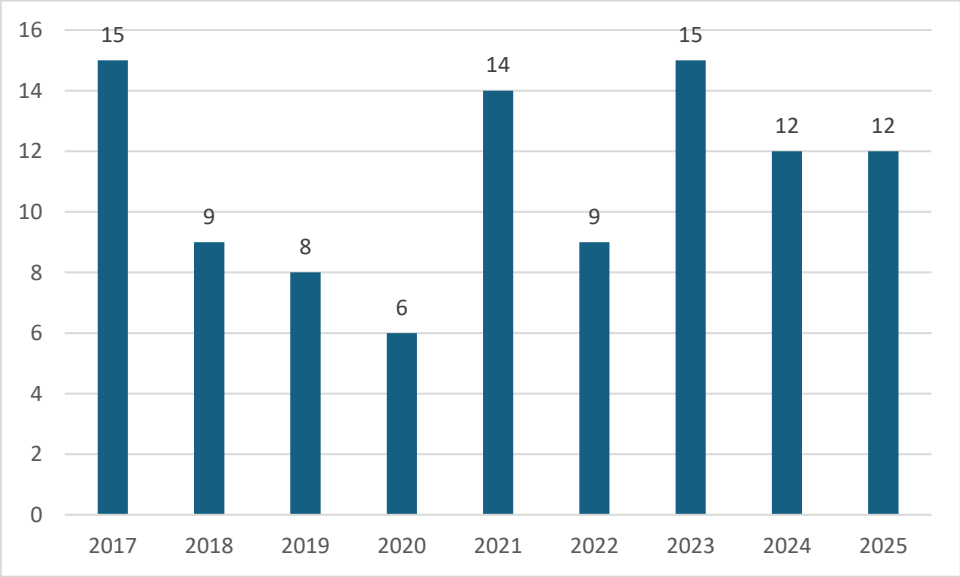
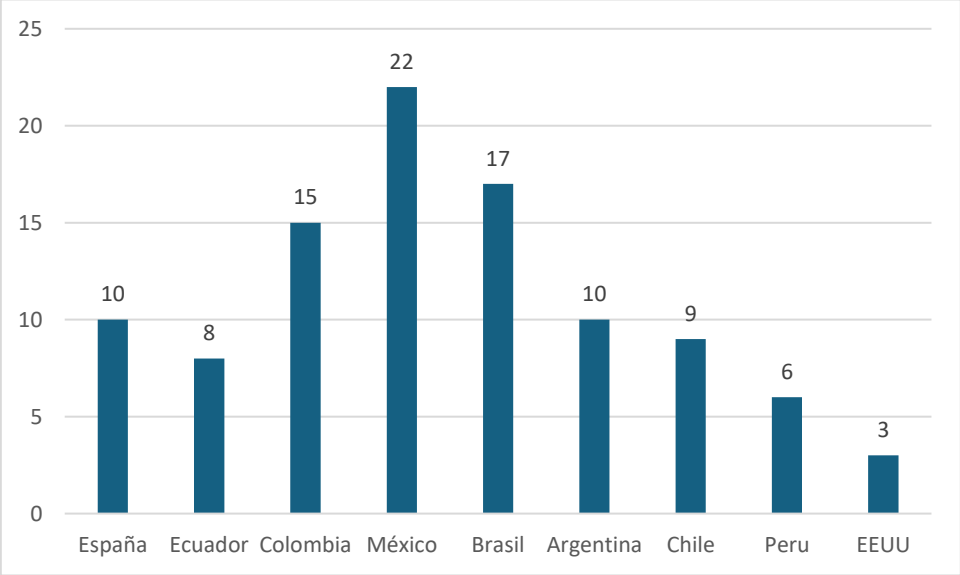


**Gráfico 2.** *Artículos de acuerdo a su origen*



## 6. Planeación y programación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana

La planeación petrolera requiere inicialmente un proceso de organización por fases que garantizan la tenencia del producto y sus derivados, las cuales se abren paso desde la extracción del petróleo, teniendo en cuenta que en la cadena de hidrocarburos se deben realizar actividades cruciales que van desde la exploración y la explotación, una vez identificados los pozos de yacimiento del petróleo se deben llevar a cabo estudios geográficos, geológicos y sísmicos de la tierra que una vez aprobados y confirmados conllevan a la excavación y así obtener el petróleo en su estado crudo (EALDE Business School, 2020). De esta manera, se continua con a fase de perforación en donde se requieren equipos especiales que permitan la operación y obtención del petróleo sin ningún tipo de inconvenientes, en este proceso no solo es crucial alcanzar llegar al pozo, sino que se pueda contar con una estructura solida que facilite en gran medida el acceso al líquido ya sea desde una base terrestre o marítima (EALDE Business School, 2020).

Seguidamente, lo que concierne a la producción y procesamiento del petróleo se ha de requerir un sistema de tuberías que va a llevar el producto de un punto a otro hasta llegar a la superficie, de esa forma, los hidrocarburos, el petróleo y el gas natural pueden fluir adecuadamente y con la seguridad que proporciona el mismo sistema (EALDE Business School, 2020). Una vez se tiene acceso a los productos mencionados, se deben trasladar para ser transformados o para derivarse en productos más simples, lo que se le conoce en la industria petrolera como proceso de refinamiento, lo que lleva a la obtención de aceites combustibles, la gasolina, asfalto, caucho sintético, variedad de productos químicos, plásticos, disolventes, lubricantes, pegamentos y otros, teniendo en cuenta que su importancia a nivel industrial es alto, dado que es el que termina de detallar el uso del petróleo y sus derivados en las manos de quienes acceden a ellos (EALDE Business School, 2020).

Finalmente, se tienen las fases de transporte y almacenamiento y la distribución del petróleo. En lo que concierne al trasporte y almacenamiento las grandes industrias debe contar con zonas exclusivas que en la mayoría de los casos se encuentran ubicadas en zonas apartadas, así se sobre entiende que las rutas que llevan al almacenamiento en cada proyecto deben estar definidas para que estas puedan ser trasladadas sin complicaciones; no obstante, se ha de tener en cuenta que el transporte se ejecuta mediante oleoductos o buques (EALDE Business School, 2020). Por su parte, la distribución se consolida una vez se obtengan los productos específicos derivados del petróleo, gas e hidrocarburos, en esta fase no solo se deben generar alianzas que permitan la venta de los mencionados, sino que la compañía o empresa debe implementar métodos de marketing y estrategias que diversifiquen las opciones tanto de venta como de fidelización de los clientes sin importar el tamaño de sus negocios, lo que lleva a un flujo de movimiento en el sector económico que refuerza el consumo y acceso a las innumerables mercancías (EALDE Business School, 2020).

A partir de todo lo anterior se ha de mencionar que para que cada una de las fases mencionadas funcionen a la perfección o en un porcentaje estimado de eficacia, se necesita de un sistema de planeación que articule tanto lo anterior como la macro estructura de un proyecto en su ciclo de vida definido, es decir, a corto, mediano y largo plazo, incluyendo aspectos tanto de situaciones de riesgo como de incertidumbre y de mejora. Por lo que, la toma de decisiones en este tipo de campos puede ser de gran cuidado, asumiendo que el impacto de las funciones de un adecuado manejo interno y externo de una estructura petrolera puede ser tanto negativo como positivo (Quiroga, 2023). Es aquí donde la adecuada organización de un modelo de mantenimiento predictivo es esencial, debido a que los datos de los estudios y análisis geológicos y geográficos por sí mismos no proporcionan la información completa para poder garantizar el funcionamiento optimo que se espera tendría cualquier plataforma petrolera, por ende, se debe dar espacio a la incertidumbre que den paso a la gestión de modelos predictivos que posibiliten en gran medida tener un plan de acción que anticipe fallas o daños en los equipos y

así aumentar los niveles de eficacia y efectividad de estos (Saussus & Sams, 2014 citado por Quiroga, 2023).

Consecuentemente, la macroplaneación de un proyecto petrolero en cuyos procesos de la cadena de valor que pueden ir desde explorar, desarrollar, producir hasta expandir requieren no solo solvencia economía, sino crecimiento, eficacia y responsabilidad social, por lo que el papel del mantenimiento en sí se torna demasiado indispensable, que por medio de herramientas y/o dispositivos tecnológicos generan una base sólida y sofisticada para la revisión y monitoreo exhaustivo de las condiciones de los equipos y maquinaria, pero también de las posibles averías, fallas o daños que se pueden presentar de forma temprana, haciendo énfasis en características operacionales, de desgaste, vibración, pureza y hermeticidad, en base a ejes puntuales que indican la operación nominal y las propiedades del equipo en caso de ser nuevo y lo que refleja cuando inicia su funcionamiento (Saldivia, 2013).

Saldivia (2013) destaca que el mantenimiento predictivo dentro de la planificación de un proyecto facilita en gran medida la inspección o vigilancia, protección, diagnóstico de fallas y esperanza de vida, lo que conlleva a un panorama enriquecido de datos que le van a permitir a la empresa tomar decisiones, sin embargo, uno de los aspectos más cruciales en términos de beneficios alude a la disminución de costos materiales y operacionales. La solvencia económica dentro de un macro proyecto petrolero se traduce en ejecución y avance, y en caso de no contar con un sistema de predicción optimo con respecto a las operaciones, los porcentajes de cumplimiento y el avance real van a ser bajos, mientras que con la tenencia de un modelo de mantenimiento predictivo no se ha de esperar a que se presente una avería o problema, sino que se actúa conforme la necesidad, proporcionando respuestas optimas, componentes, equipos y una estructura con un nivel de funcionamiento excepcional. Así, en el eje de eficacia de la cadena de valor de producción se incluye el mantenimiento como un costo operativo del petróleo, pero también aumenta la vida de los equipos, la seguridad y confiabilidad como se disminuyen los riesgos operacionales.

De esta manera, el mantenimiento predictivo se aplica a partir de diferentes técnicas y/o herramientas que conllevan un proceso de diagnóstico y monitoreo que se ejecuta eficientemente, en pocas palabras, la implementación de este accede a las fortalezas como a las falencias que a su vez generan acciones de mejora progresivamente conforme los resultados obtenidos. No obstante, aunque el mantenimiento predictivo se ubique en la cadena de valor en el eje de eficacia dentro de la macro – planeación del proyecto se debe ver reflejada en cada una de las fases que comprenden el Upstream, Mindstream y Downstream, teniendo en cuenta que en estas se hacen indispensables análisis que favorezcan las diversas operaciones que se realizan que van desde la exploración hasta la comercialización.

En este orden de ideas, Quiroga (2023) sostiene que la planeación dentro de la consolidación de un proyecto petrolero es un elemento indispensable, sobre todo cuando se enfocan en la contribución para la organización y diseño de planes de desarrollo de campos petroleros, teniendo en cuenta que estos detallan a cabalidad las estrategias a utilizar en el proceso de extracción de los materiales, así como etapas de evaluación, infraestructura, costos, producción, mantenimiento, entre otros elementos inherentes al mismo. Frente a esto, puede parecer normal que muchas industrias inviertan en proyectos petroleros que se tornen provechosos, pero que en su estructura no se aprovechan procesos y/o modelos funcionales en el más alto nivel, como en el caso del trabajo de Velásquez & Alexander (2018) aludiendo que a pesar de que la tecnología brinde nuevas metodologías o modelos de equipos más confiables que permitan tener una planeación y plan de desarrollo favorable sustentándose en acciones más preventivas, siguen distando de implementar un modelo de mantenimiento predictivo que puede ser mucho más eficiente y eficaz como el caso del MBC, cuya factibilidad se ha confirmado científicamente en el campo.

Por su parte, Tapia et al., (2024) detallan como en la era de la cuarta revolución industrial o la denominada industria 4.0 se caracteriza por contar con tecnologías y herramientas que impactan proactivamente en los procesos de producción de las organizaciones, tal como lo es el mantenimiento predictivo, un

componente esencial por excelencia que potencia los activos industriales, donde los autores hacen énfasis no solo en su capacidad de optimización, sino también en su aplicabilidad desde el Machine Learning, cuyos estudios analizados resaltan la utilización de algoritmos de búsqueda que destaquen el mantenimiento que puede llegar a ser más efectivo dependiendo el caso, incluyendo al mismo tiempo las variables de costos y vida útil de los activos. Todo un cluster de información se genera a partir de la integración de la inteligencia artificial a los modelos de mantenimiento predictivo, con el fin de procesar el estado de salud de los equipos y maquinas, mezclando diferentes técnicas que arrojen en el menor tiempo posible datos cruciales que permitan comprender las condiciones de estos, como las acciones que se pueden tomar para intervenir correctamente.

También se hace mención a la planificación predictiva desde la perspectiva del mantenimiento en la industria 4.0, donde se esclarecen como diferentes autores como Abidi et al., (2022) dentro de sus planteamientos proyectan la integración de modelados data-driven en los marcos de la planificación, con el propósito de mejorar significativamente la calidad de los componentes de los activos o equipos, así se puede garantizar la obtención de información confiable con un mayor nivel de precisión y que especialmente sea rentable y sostenible, lo que se concluye en términos de gestión de calidad de producción, es decir, el mantenimiento predictivo fortalece la calidad, protege al producto, optimiza recursos y sostiene al sis (Tapia et al., 2024).

No se puede dejar por fuera el magnate colombiano, como lo es ECOPETROL, cuyos modelos de gestión para la planeación y ejecución de mantenimientos en campos de desarrollo y producción se realizan de manera periódica en el tiempo, tal como lo esbozan Jácome Pérez & Pérez Wuillemier (2020) quienes mencionan que el objetivo es incrementar la vida útil de los equipos y retardar las inversiones de reposición de los mismos, relacionando un flujo de información, actividades, elementos claves, procedimientos y las transacciones del proceso, donde los modelos albergan tanto la gestión de activos y como el modelo financiero que soporta la ejecución con base en las premisas de disciplina operativa,

así como también un esquema de seguimiento y control para el proceso que permita la flexibilidad, diligencia y eficiencia en la planeación y ejecución, como una herramienta que apoye el logro de los objetivos planteados para las inversiones, con indicadores claves de ejecución y financiera que den paso a la oportuna gestión sobre desviaciones que se puedan presentar durante la ejecución de los mismos.

En este orden de ideas, la planificación y programación del mantenimiento predictivo, cuya necesidad no solo ha quedado clara en apartados anteriores, sino que es sumamente indispensable, parte del monitoreo de los activos por medio de sensores que recolectan información acerca del funcionamiento de estos que una vez compilados y analizados permiten predecir o anticiparte a fallas probables, lo que lleva a la identificación de las posibles acciones y su eficacia para la organización, siendo estas de carácter preventivo o correctivo, confiando en la jerarquización de los riesgos y la prioridad que se le debe dar a cada uno. Con lo anterior, se pretende dejar en claridad que tal como menciona Cervantes et al., (2019) el mantenimiento predictivo es una herramienta que ha transformado la industria a través de sus pilares de calidad, seguridad y disponibilidad, por ende, su planificación, programación y aplicación deben ser concretos y definidos.

## 7. Normativa que fundamenta el mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana

Inicialmente, como un dato básico se ha de mencionar y afirmar que en el contexto colombiano no existe un marco normativo establecido ni bien definido que sustente y/o fundamente el quehacer – implementación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera, pero no solo en este sector, es decir, el vacío se aplica a las industrias que comparten el uso de maquinaria y equipos específicos de acuerdo al tipo de operaciones que realicen. Parece ser bastante inquietante el hecho de que hoy por hoy con industrias y compañías sumamente grandes y globalizadas en Colombia no se haya establecido un apartado legal que fundamente la obligatoriedad frente a la tenencia de un programa de mantenimiento predictivo que simplifique y optimice las actividades operacionales, sin embargo, no es sorpresa que no exista la norma, dado que el contexto político en sí representa un contexto de muchas problemáticas, lo que significa que a la luz del sector político económico no se ha generado una necesidad propia de establecer este recurso o herramienta.

A nivel técnico se logró identificar que el Decreto 1079 de 2015 para el sector transporte puntualiza en las obligaciones que se han de tener frente a los procesos de mantenimiento del transporte público, lo que inspira la inferencia arbitraria de confirmar que a nivel general en el sector industrial el hueco que rodea la actividad de mantenimiento predictivo no es importante, considerando que este se relaciona con los objetivos estratégicos de cualquier compañía en los estándares que se conocen de seguridad y salud en el trabajo con el fin de salvaguardar no solo al personal, sino también a la infraestructura como un elemento que en el caso del campo petrolero es indispensable. Esta norma desglosa en su contenido no solo la clasificación de los diferentes transportes que se manejan en el territorio nacional, sino que define para cada uno de ellos aspectos como regulación integral, planes y políticas relacionadas con el transporte y el tránsito, la presentación de la infraestructura que se requiere, normas de seguridad vial y regulación técnica y

económica. Este último elemento mencionado de regulación técnica y económica se focaliza en las necesidades de aplicar el mantenimiento preventivo con fines de garantizar que los vehículos, cualquiera que sea se encuentre en las condiciones necesarias y requeridas para prestar el servicio de transporte. Así como también, se hace mención a que este tipo de acciones las debe realizar el propietario del vehículo, contemplando un proceso interno que confirma y aprueba las deficiencias presentes con el fin de definir los lugares y la periodicidad con las cuales se debe implementar el mantenimiento preventivo.

En efecto, se puede visualizar medianamente la definición de un paso a paso con fines de prevenir cualquier tipo de riesgos que pueda presentar el equipo y evitar al máximo poner en peligro la integridad de los usuarios o clientes que usan el servicio, también contemplado desde los planes de rodamiento, los requisitos de habilitación del servicio, regulación de infraestructura, desvinculación, responsabilidades de las empresas prestadoras del servicio, entre otros. Este tipo de aspectos se pueden considerar importantes si se toman como referente para la consolidación de una norma o política que, de paso a la obligatoriedad del mantenimiento predictivo en Colombia enfocado en la industria, haciendo énfasis en el proceso de implementación, pero también en las condiciones que se debe implementar, los requisitos que se necesitan, modelos viables y sostenibles, vinculación u optimización con otras herramientas tecnológicas, sanciones, responsabilidades operativas de las compañías, entre otros.

De manera que, a pesar de ser un sector completamente diferente se puede tomar como una base en el proceso de construcción, una vez se realicen mesas de trabajo con los sectores interesados y relacionados a la industria, no solo con el propósito de salvaguardar las compañías, sino también mantener la integridad de las mismas, exigiendo de manera regulada que se cumplan con ciertos procedimientos internos que garantizan la calidad de las operaciones, tal como lo es el mantenimiento predictivo.

También se reconoció la Ley 9 de 1979 Código Sanitario Nacional de Colombia en cuyos apartados se generales se hace mención al mantenimiento

como una actividad obligatoria y necesaria en todo lo que concierne a espacios sanitarios. Lo anterior refleja no solo la ineficacia de la legalidad de una actividad de suma relevancia en el sector industrial, sino que posibilita la desinformación a nivel interno de las empresas, aunque parezca un poco descabellado muchas fallas o daños se pueden pasar por alto cuando no se hace uso de un sistema previamente instalado que cumpla la función de analizar los equipos y el nivel de funcionamiento de cada uno y sus componentes.

El sector sanitario por medio de la Ley 9 de 1979 busca proteger en gran medida los espacios naturales como de la salud pública, teniendo en cuenta que estos se relacionan con los determinantes sociales en salud y su relevante papel en el bienestar y equilibrio de las especies que conviven en la humanidad. Esto se conecta con el mantenimiento predictivo en el contexto de la industria petrolera en cuanto a que esta busca zonas con particularidades geográficas y geológicas que a su vez deben ser cuidadas, sobre todo cuando se trata de estaciones marítimas y terrestres, debido a los ecosistemas que puedan estar presente o rodeando los yacimientos de petróleo, los cuales requieren de ciertas medidas para poder seguir prosperando en condiciones no alteradas por la huella humana. No obstante, las fallas o daños en activos o equipos pueden representar un enorme peligro para los mencionados, teniendo en cuenta que el petróleo es una sustancia tóxica y nociva que puede llegar a destruir un ecosistema entero, intoxicar y alterar gravemente las condiciones del ambiente donde se encuentre, sin mencionar el impacto en las especies que residen en ese tipo de zonas.

En consecuencia, la ley desglosa el control que se debe tener frente al uso del agua en los diferentes sectores, donde se incluye por obviedad la industria, también se puntualiza como objeto de la salud ocupacional la protección y el cuidado de los colaboradores frente a riesgos y diversidad de tipos como orgánicos, mecanismo, físicos o químicos. Es relevante mencionar que esta ley define las condiciones de infraestructura que debe cumplir una empresa para con sus estructuras de labor u operaciones, su localización, esquemas básicos y otros.

Sin duda alguna las normas mencionadas anteriormente pueden servir como un puente con grandes aristas que soporten y medien la construcción de una ley o decreto para la implementación obligatoria y necesaria del mantenimiento predictivo en el sector petrolero como en todo el ámbito industrial. No obstante, funcionan como un referente en la actualidad si las diferentes compañías llegaran a requerir de un manual o información técnica puntual relacionada con el mantenimiento de activos y protección de las zonas de producción.

## Normas Técnicas Internacionales ISO

### *ISO 13381*

La norma ISO 13381 es un protocolo o lineamiento en la que se establece lo que concierne a los procesos de diagnóstico y condición de un sistema, definiendo en su estructura técnicas y herramientas puntuales para la ejecución de un plan predictivo que permita la colaboración frente a la determinación del rendimiento, condición, calidad y fiabilidad de los sistemas y los elementos que los componen. También, provee un marco evaluativo que proporciona los pasos que miden la condición de los equipos o maquinas, en pro de identificar falencias o déficits y tomar medidas para resolver la situación (Rosales, 2023).

En base a lo anterior, se puede afirmar que esta norma internacional sustenta ampliamente el quehacer e implementación del modelo de mantenimiento predictivo, teniendo en cuenta que no solo esclarece que se deben realizar acciones frente a la revisión progresiva de un sistema, sino que también presenta y desarrolla enfoques basados en el rendimiento, técnicas de la vida útil basados en ciclos y modelos de predicción de vida útil. Sin duda alguna esta norma detalla el funcionamiento del mantenimiento predictivo y lo posiciona en un eje que da a entender la importancia que tiene para la industria y la economía, que a nivel nacional hace falta, pero que se toma como un referente para poder evolucionar y transformar el mercado con el paso de los años.

Aunque la norma ISO 13381 se presente como un referente que pueda ser utilizado en el contexto colombiano, es crucial que se consolide una norma nacional especifica que permita abordar el plano industrializado desde el mantenimiento predictivo como un eje central de las operaciones y/o actividades que realizan las empresas. Lo cual puede llegar a fortalecer el sistema o programas de acciones nacionales para las empresas, contando con aspectos detallados que proporcionen prácticas adecuadas y optimas en dicho sector, es decir, un documento formal que contenga información pertinente de las técnicas, herramientas y aplicaciones del mantenimiento predictivo.

Si, en el plano colombiano se quisiera establecer un paralelismo con esta norma a fines de consolidar un plan o proyecto enfocado en la implementación del mantenimiento predictivo, se puede proyectar desde las diferentes etapas que propone la ISO 13381 para el monitoreo de condiciones y diagnósticos, siendo estas: detección de problemas, diagnósticos, pronósticos, recomendaciones de solución y análisis de resultados. En este sentido, el mantenimiento predictivo quedaría plasmado como una necesidad para toda la industria petrolera, pero también para todo el sector industrial, por lo que con la contemplación de un marco colombiano para este se generaría un impacto significativo en la garantía y eficacia de las operaciones tanto a nivel interno como externo, procurando condiciones mecánicas y técnicas óptimas, tal como se menciona, aunque muy concretamente en el Decreto 1079 de 2015 para el sector transporte.

### *ISO 14224*

La norma ISO 14224 se concentra puntualmente en lo que concierne a recolección y presentación de datos de confiabilidad como el mantenimiento para los equipos de las industrias petroleras, petroquímicas y de gas natural (Rosales, 2023). En esta se puede encontrar información detallada sobre los lineamientos que permiten una eficaz recopilación de datos confiables y mantenimiento, por medio de etapas que van desde la codificación, documentación, análisis hasta la presentación de los mismos (Rosales, 2023). Uno de los aspectos o característica más importante

que rodea a esta norma es su generalidad, es decir, no solo es aplicable a la industria petrolera, aunque se diseñó exclusivamente para ella, sino que sus parámetros pueden ser de gran utilidad para otro sector industrial.

La estructura bien consolidada de la ISO 14224 a través del proceso especificado que suscita optimiza en gran medida la toma de decisiones frente a las situaciones que se hallen tanto a nivel técnico como estadístico con los equipos que son analizados y sus componentes. De esta manera, su relación con el mantenimiento predictivo es inherente a este, dado que establece un manual interno del procesamiento y evaluación general de los sistemas que contribuye ampliamente a lo que se espera de una máquina, un funcionamiento de alta calidad, considerando las condiciones externas y/o internas que puedan afectar a estas estructuras.

Así como la norma ISO 13381, la 14224 también se concibe como un compendio de información sumamente relevante para la implementación eficaz del mantenimiento predictivo a nivel industrial, sobre todo en el plano petrolero donde los riesgos pueden llegar a ser catastróficos no solo la empresa en términos de perdidas, sino para los elementos ecológicos y biológicos, debido a la zona donde se hallan y la vulnerabilidad de los ecosistemas y especies que en este se encuentran. No obstante, a diferencia de la ISO 13381, la norma 14224 se genera exclusivamente para la industria petrolera y semejante, por lo que conlleva mucha más pertinencia en el sector, siendo así que sería una enorme ventaja a nivel nacional contar con una norma técnica parecida que se ajuste tanto a la maquinaria y equipos, sino también a las características geográficas y geológicas de Colombia.

En efecto, esta norma sería de gran contribución para las industrias colombianas, debido a que su estructura se constituye ampliamente por un sistema de recopilación estandarizada de datos que son confiables para la garantía de las operaciones como para el mantenimiento, lo que se ejecuta en termino de tres etapas indispensables, los datos del equipo, los datos de las fallas y los datos del mantenimiento; sin embargo, esto no se realiza de manera general a los activos, sino que la norma expone una clasificación jerárquica para los equipos y maquinas,

es decir, se organizan estos conforme su ubicación y su uso. De igual forma, se detallan los tipos de mantenimiento a tener en cuenta, que va desde lo planificado hasta lo no planificado, de acuerdo a las acciones que se implementan en cada uno de ellos.

Con todo el compendio de información mencionada con anterioridad, se puede asumir con gran certeza que las ISO, tanto la 13381 como la 14224 son el complemento de la otra y si en Colombia se toman como una base para el diseño y estructuración de una norma específica enfocada en la implementación del mantenimiento predictivo sin dudar, se puede proyectar una norma completa, que responda a todas las necesidades de la industria en términos de mantenimiento.

## Legislación de Seguridad y Salud en el Trabajo

### *Ley 9 de 1979 Código Sanitario Nacional*

Esta ley se conoce como una norma legislativa que consagra en su estructura una serie de medidas sanitarias que salvaguardan la integridad de las personas y su salud como del medio ambiente donde estas se desenvuelven, haciendo especial énfasis en recursos como el agua y los residuos, pero también en aspectos clave la salud ocupacional e infraestructura sanitaria. Su relación en este caso con el mantenimiento predictivo se ve reflejada en los apartados que se dedican a la salud ocupacional y edificaciones, teniendo en cuenta que se deben tener en cuenta los procesos, programas y acciones que prevengan los riesgos en el contexto laboral y el buen funcionamiento de la estructura organizativa.

## Normas de contratación pública

### *Acuerdo Marco de Colombia Compra Eficiente (CCE-286-AMP-2020)*

Este acuerdo suscita principalmente la consolidación de un documento donde quedan establecidos aspectos relacionados con la accesibilidad del mantenimiento preventivo y correctivo, así como las condiciones que se han de

tener en cuenta, sin embargo, el objetivo o alcance de esta norma solo se limita al sector automotriz, lo que significa que a pesar de manejar el mantenimiento preventivo que suele ser bastante semejante al predictivo no existe un fundamento que permita vislumbrar su aplicabilidad al sector industrial. Es de considerarse que este tipo de acuerdos pueden ser una contribución enorme a la construcción de una norma técnica y legislativa que contemple al mantenimiento predictivo dentro de la industria petrolera o de forma general al sector industrial, para que se pueda contar con un marco regulatorio especificado y confiable, garantizando el óptimo funcionamiento de los equipos y maquinas en las diferentes actividades operacionales.

Todo lo mencionado con anterioridad permite reconocer que a nivel nacional no solo existe una falencia normativa que se ajuste a las necesidades y obligaciones del sector industrial, sino que da cuenta del enorme vacío que representa para esta, considerando los riesgos y el poco fundamento que solidifiquen las operaciones petroleras en el territorio colombiano, lo que significa que esto se puede presentar como una desventaja frente a otras naciones. A pesar de que se haga uso de las normas técnicas internacionales, es indispensable contar con un marco normativo propio que permita reconocen el accionar y aplicabilidad del mantenimiento predictivo en los diferentes sectores de la industria, especialmente en el petrolero, dado que hoy por hoy son compañías que no operan individualmente, sino que se vinculan con empresas internacionales que favorezcan las operaciones de manera bidireccional.

## 8. Aplicabilidades del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana a partir de la revisión documental

El proceso de búsqueda de la información y en general lo que concierne a la revisión de la literatura por medio de fuentes confiables que permitieran acceder a documentos, artículos e investigaciones relevantes no solo fue trabajo arduo, sino que comprendió en su momento la revisión exhaustiva de datos que a pesar de ser muchos, se logró evidenciar una escasa producción científica alrededor de la aplicación del mantenimiento predictivo en equipos o maquinaria del sector industrial petrolero. Sin embargo, se identificar una pequeña cantidad que se caracterizan por ser en gran medida con una perspectiva generalizada, es decir, no presentan una tendencia orientada puntualmente al tema mencionado. Inicialmente, se encontró el trabajo de Medina (2022) que se enfocó principalmente en la exposición de los tipos de mantenimiento que se pueden aplicar en los procesos de producción de pozos petroleros, cuyos resultados dejaron en evidencia que en la muestra seleccionada de la industria petrolera existe una falencia alrededor de la casi que nula implementación de los mantenimientos predictivo y preventivo, mientras que hacen mucho más énfasis en la aplicación del mantenimiento correctivo, demostrando de igual forma que los planes consolidados para ello también presentan fallas en su estructuración que se enfocan en las diferentes unidades de producción de las empresas.

Ballén Cárdenas (2017) realizó un análisis basado en la aplicación del modelo de mantenimiento predictivo a una serie de equipos de superficie de facilidad de la producción del petróleo, considerando su implementación en equipos críticos. La perspectiva metodológica se abre paso con la revisión de los equipos identificando el tipo de equipo y el funcionamiento del mismo, continuando con la revisión de criticidad y confiabilidad, cuyo análisis se realiza desde los diagramas de bloque de confiabilidad, determinar los equipos críticos, identificar las fallas y, finalmente, se selecciona o guía el tipo de mantenimiento que más se ajusta a las necesidades encontradas. De esta manera, el diagnóstico realizado tras la

implementación de las primeras etapas del proceso permitió reconocer aquellos equipos en estado crítico, siendo estas los compresores de gas, las bombas de transferencia de crudo, las bombas de transferencia de agua y los compresores de aire. Continuamente, las técnicas utilizadas para la intervención de los equipos fueron el análisis de vibraciones, de lubricantes, monitoreos de compresores de gas, ultrasonidos, diagnósticos de válvulas, termografía, inspecciones visuales y análisis de corriente de motores. Por consiguiente, los resultados de la ejecución del mantenimiento predictivo en los equipos de superficie que mejoró en un 97% la disponibilidad mecánica, aumentando la confiabilidad de cada uno de estos lo que impacto en una mayor cantidad de producción de petróleo gracias a la optimización en el bombeo.

Para el caso del trabajo de Cano Suarez (2024) en el que se orientó básicamente en una revisión que pone de manifiesto las tecnologías que hoy por hoy se están utilizando en la industria petrolera. Su desarrollo esboza información pertinente relacionada con diferentes herramientas tecnológicas que han emergido para introducirse en los procesos de perforación, construcción de yacimientos, mantenimiento de pozos, producción, refinación y transporte, con la finalidad de consolidar un sistema que de manera pertinente identifique y prevenga fallas o falencias en los equipos y maquinaria, garantizando la integridad de las mismas como del personal. Los resultados presentan una narrativa a partir de los métodos empleados en la inspección de la industria del petróleo, puntualizando a groso modo el uso de técnicas del mantenimiento predictivo como la inspección visual, ultrasonidos, sistemas de monitoreo y otros; proponiendo al mismo tiempo tanto las ventajas como las desventajas de cada una. También es crucial mencionar que dentro del apartado del mantenimiento de activos se vislumbra el mantenimiento predictivo contribuyendo a la optimización continua y el análisis de datos; así mismo en la reducción de costos y tiempo de inactividad, gracias a la detección temprana de fallas o daños y evitando catástrofes internas. Concluyendo que, es indispensable que las industrias petroleras cuenten con mantenimientos que faciliten no solo las inspecciones y las intervenciones no planificadas, sino que garantiza la seguridad de toda la infraestructura.

Por otra parte, Villegas & Pérez (s.f.) concentraron su investigación en como la inteligencia artificial puede tomar decisiones de acuerdo a los diagnósticos y análisis de datos ejecutados por el mantenimiento predictivo en equipos turbocompresores. La perspectiva metodológica se basó en un diseño mixto de revisión documental y de campo, haciendo uso del método Cross Industry Standard Process for Data Mining. Por medio del análisis de vibraciones e imágenes boroscopias se identifica equipo en estado crítico, específicamente 6 fallas: vibración en turbina, alta temperatura, alta presión en el filtro de entrada de aire y en el filtro del compresor, alta temperatura de descarga del compresor y recirculación en el compresor. La implementación se logró con un software de aprendizaje autónomo que se ajustó al modelo de mantenimiento predictivo haciendo uso de etiquetas de acuerdo a la condición en la que se encuentre las fallas a predecir, lo que arrojo una matriz de clasificación en un árbol de decisión, lo que les permitió concluir que la interrelación de la inteligencia artificial con los modelos de mantenimiento predictivo se asocia para proporcionar análisis predictivos de las maquinas con la finalidad de contar con múltiples soluciones y sugerencias para poder tomar decisiones confiables.

Continuando con el documento de Alvarado Beltrán & Longo Meneses (2024) el cual se orientó al mantenimiento 4.0 para la construcción de un modelo de mantenimiento predictivo con el fin de gestionar estrategias optimas de mantenimiento en la industria petrolera y de gas. Con una metodología de análisis bibliográfico, lo que lleva al diseño de modelos de mantenimiento predictivo, seleccionando la Regresión Lineal, el Random Forest, el Gradient Boosting, SVR, el Análisis de Agrupamiento K-Means y el Análisis de Componentes Principales (PCA). Los resultados se presentan en términos de la esquematización de la estructura de los datos en base a su análisis por cada uno de los modelos, comparando el impacto que tienen, en lo que se destaca el Machine Learning con un óptimo desempeño en la detección y predicción de fallas.

El trabajo de Moscoso Jacome (2017) se centró en un programa de control que soporta el mantenimiento en activos mecánicos que se utilizan en el proceso

de transporte de hidrocarburos, por medio de una metodología aplicada y correlacional dieron como resultado que específicamente los mantenimientos de tipo preventivo y predictivo empezaron a utilizarse, es decir, aplicarse en el contexto de la investigación científica y exposición de los mismos desde el año 2016, mientras que en años anteriores de hacia uso de mantenimientos mucho más preventivos, debido a que no se le consideraba como importante o necesario en el sector industrial petrolero, sin embargo, en la medida en que se fue masificando la implementación de los mantenimientos preventivos y predictivos disminuyeron los de tipo correctivo, confirmado estadísticamente con una variación de 0.22 a 0.25 de correlación por medio del Rho de Spearman. Continuando con los apartados del trabajo, en el proceso de implementación del mantenimiento predictivo a motores y bombas de la empresa EP PETROECUADOR, mediante la técnica de análisis de vibraciones, haciendo uso del Detector II y Trendline 2 software para la definición de la base de datos y la medición de las condiciones a través de la ruta establecida. Con lo que se llega a la conclusión de que el uso programado del mantenimiento predictivo redujo en un 44% los mantenimientos correctivos, con una capacidad de funcionamiento de los activos y del software del 100%.

Otra investigación fue la llevada a cabo por Villegas Morphy (s.f.) con el objetivo de asociar la inteligencia artificial con el mantenimiento predictivo en el análisis de equipos de turbocompresores y optimizar la toma de decisiones; haciendo uso de una metodología CRISP-DM y un diseño mixto de revisión documental y de campo. Cuyos resultados dejaron en evidencia el desarrollo de un capítulo dedicado a la contextualización de la importancia de la toma de decisiones frente a las problemáticas que se presentan en los equipos mencionados y, en general en la industria del petróleo, las cuales conllevan un proceso de evaluación y planificación en el marco de los objetivos estratégicos y el cumplimiento de los ejes de la cadena de valor del proyecto. En este sentido, el mantenimiento predictivo se convierte en una herramienta de análisis de condiciones como del monitoreo de los equipos y la organización de las fallas y los parámetros que requieren para la intervención de las mismas. De esta manera, la implementación del mantenimiento en el presente trabajo se consolidó gracias a la construcción de fases metodológicas

que guiaron las operaciones, iniciando con la fase de análisis, continuando con la estructura del mantenimiento, los datos de las condiciones de los activos, el análisis de modo y efecto de falla FMEA, en la que se encontraron fallas asociadas a la deficiencia en la vibración, temperatura, presión y recirculación en los compresores. En consecuencia, la articulación de la inteligencia artificial al modelo de mantenimiento predictivo asume por sí misma la integración de elementos y/o componentes que permiten tener un mejor panorama de las condiciones de los activos, alcanzando identificar modos y efectos de fallas basados en los datos arrojados por las predicciones, siendo estos de carácter confiable y con soluciones puntuales a las fallas más comunes que se suelen presentar en los turbocompresores.

Por otra parte, Soto (2021) se dio en la tarea de generar un análisis exhaustivo de los procesos de perforación y rehabilitación petrolera por medio de las gerencias que las manejan, empleando una metodología descriptiva y de campo, cuya población se conformó por 4 gerencias de perforación y rehabilitación petrolera de esta industria. Los datos encontrados a partir del proceso de evaluación dejaron en evidencia la necesidad del mantenimiento no solo en las operaciones internas de la industria petrolera, sino que es un elemento sumamente importante en la estructura organizacional. Así, las cidras demostraron que en un 100% existe la presencia de cumplimiento en las funciones de planificación, organización, programación, ejecución y control, como las principales etapas en el proceso de gestión del mantenimiento, considerando el orden de prioridad de acuerdo a los diagnósticos identificados. En cuanto a las estrategias de mantenimiento se evaluaron los siguientes: correctivo, preventivo, predictivo y proactivo, teniendo como categoría de cumplimiento alto el mantenimiento correctivo y preventivo, mientras que los demás se clasificaron como moderado, incluyendo el mantenimiento predictivo, lo que genera una discusión respecto a las actividades completas que realiza este tipo de mantenimiento dentro de la gestión de activos con fines de identificar mal estado, fallas y funcionamientos de los mismos sin necesidad de emplear un pare o stop en la producción. Lo cual su suscita que a pesar de que se ejecuten los diferentes modelos de mantenimiento existen falencias

o un déficit en la gestión por parte de las gerencias involucradas en términos de demoras en los procesos compras, desorganización en las ordenes de trabajo y ausencia en la definición de herramientas de evaluación enfocadas en el desempeño de la gestión real que presentan.

Como se detalla en lo esbozado con anterioridad, las aplicabilidades del mantenimiento predictivo son indispensables en la industria petrolera desde lo que concierne a superficie de facilidad de la producción del petróleo y su implementación en equipos críticos, uso de herramientas tecnológicas emergentes en los procesos de perforación, construcción de yacimientos, mantenimiento de pozos, producción, refinación y transporte, así como de inteligencia artificial y su papel en la toma de decisiones de acuerdo a los diagnósticos y análisis de datos ejecutados por el mantenimiento predictivo en equipos turbocompresores. De igual forma, se dejo en evidencia la reorientación del mantenimiento a una metodología 4.0 que incluyó modelos de mantenimiento predictivo que albergan la Regresión Lineal, el Random Forest, el Gradient Boosting, SVR, el Análisis de Agrupamiento K-Means y el Análisis de Componentes Principales (PCA); otra aplicabilidad importante se denota en el proceso de transporte de hidrocarburos a motores y bombas de empresas que optaron por elaborar y ejecutar programa de control de mantenimiento enfocados en activos mecánicos.

Es crucial hacer referencia a los estudios de condición Risk Based Inspection RBI y de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM que realiza Ecopetrol, lo que se puede evidenciar en el trabajo llevado a cabo por Díaz Granados et al., (2024) referentes a planes de mejoramiento en equipos tácticos, por medio de la metodología de gestión de parada de plantas se consolida las fases de conceptualización de la parada, gerencia de planificación, la cual hace énfasis en el mejoramiento en la planificación y programación de las actividades de inspección; la gerencia de ejecución que incluye la pre-parada, la ejecución y el pre-arranque; y como fase final la gerencia de cierre, cuyos beneficios se concentran en procesos de inspección y recomendaciones confiables, técnicamente viables y costo efectivas, optimización de equipos, disminución en el tiempo del mantenimiento,

disminución de retrabajo y de recursos tantos económicos como humanos, disminución en el riesgo de accidentalidad y otros.

Finalmente, es claro precisar que la revisión de la literatura proporciona información de suma relevancia para el presente trabajo, no obstante, las investigaciones enfocadas en la implementación del mantenimiento predictivo en el caso de equipos críticos fue bastante escasa, pero se logró detallar en gran medida la rigurosidad y eficacia de este tipo de mantenimientos en la industria petrolera, que de acuerdo a los equipos y maquinaria se requerirán de análisis y/o técnicas específicas que den cuenta de las condiciones y estado de los mismos, así como también se destaca que se exploran espacios de integración con la inteligencia artificial como una herramienta que puede llegar a convertirse en una aliada importante.

## 9. Análisis

El documento desarrolla de manera amplia y estructurada la importancia de la planeación y programación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana, articulando tres ejes fundamentales: el contexto operativo de la cadena de valor petrolera, el marco normativo (o su ausencia) y la aplicabilidad del mantenimiento predictivo a partir de la revisión documental. En términos generales, el texto presenta una base teórica sólida y un respaldo bibliográfico pertinente; sin embargo, también evidencia limitaciones conceptuales, normativas y metodológicas que merecen ser analizadas críticamente. En primer lugar, el abordaje de la cadena de valor del sector petrolero (upstream, midstream y downstream) permite contextualizar adecuadamente la complejidad operativa del sector y justificar la necesidad de modelos de mantenimiento más avanzados. No obstante, el análisis tiende a ser predominantemente descriptivo, con escasa problematización de las particularidades del contexto colombiano, como la heterogeneidad tecnológica entre campos petroleros, la obsolescencia de ciertos activos o las restricciones presupuestales que enfrentan algunas compañías, especialmente las de menor escala. Esto limita la capacidad del texto para trascender la generalidad y profundizar en los retos reales de implementación del mantenimiento predictivo en el país.

En cuanto a la planeación del mantenimiento predictivo, el documento acierta al destacar su rol estratégico en la toma de decisiones, la reducción de costos operativos y la mejora de la confiabilidad de los activos. La integración de conceptos asociados a la industria 4.0, como el uso de machine learning e inteligencia artificial, fortalece el argumento y lo alinea con las tendencias globales del sector. Sin embargo, se observa una brecha entre el ideal tecnológico planteado y la realidad operativa nacional, ya que no se analizan con suficiente rigor las barreras técnicas, organizacionales y culturales que dificultan la adopción de estos modelos avanzados, tales como la falta de talento especializado, la calidad de los datos o la resistencia al cambio en las estructuras organizacionales.

Uno de los aportes más relevantes del texto es la identificación del vacío normativo existente en Colombia respecto al mantenimiento predictivo. El análisis crítico de la ausencia de una normativa específica evidencia una debilidad estructural del sector industrial, especialmente en una industria de alto riesgo como la petrolera. La comparación con normas nacionales de otros sectores (transporte, salud, contratación pública) resulta pertinente como ejercicio de inferencia, pero en algunos casos el paralelismo puede percibirse como forzado, ya que dichas normas no fueron concebidas para contextos de alta complejidad tecnológica ni para operaciones con riesgos ambientales y operacionales tan elevados como los del sector petrolero.

En este sentido, el uso de normas técnicas internacionales como la ISO 13381 y la ISO 14224 se presenta como una alternativa válida y necesaria ante la falta de regulación local. El documento logra explicar de manera clara la pertinencia de estas normas y su complementariedad, especialmente en términos de diagnóstico, monitoreo de condición y gestión de datos de confiabilidad. No obstante, el análisis podría fortalecerse si se profundizara en las dificultades de adopción de estas normas en el contexto colombiano, tales como los costos de implementación, la adaptación a las condiciones geográficas y geológicas del país, y la necesidad de armonizarlas con la legislación nacional existente.

Respecto a la revisión documental sobre las aplicabilidades del mantenimiento predictivo, el texto reconoce de manera acertada la escasez de producción científica específica en el contexto petrolero colombiano. Este reconocimiento fortalece la honestidad académica del trabajo y justifica la necesidad de nuevas investigaciones. Los estudios analizados demuestran de forma consistente los beneficios del mantenimiento predictivo, especialmente en términos de disponibilidad mecánica, reducción de mantenimientos correctivos y optimización de la toma de decisiones. Sin embargo, la mayoría de los casos presentados corresponden a estudios puntuales, con enfoques técnicos muy específicos, lo que limita la posibilidad de generalizar los resultados a toda la industria petrolera nacional. Adicionalmente, aunque se resalta la integración de la inteligencia artificial

como una tendencia prometedora, el análisis tiende a asumir una postura marcadamente optimista, sin profundizar en los riesgos asociados, como la dependencia tecnológica, la ciberseguridad, la calidad de los datos o la falta de marcos éticos y regulatorios para su implementación. Esto genera un desequilibrio entre los beneficios esperados y los desafíos reales de su aplicación a gran escala.

El panorama general del desarrollo temático del documento ofrece una perspectiva amplia y bien fundamentada sobre la importancia del mantenimiento predictivo en la industria petrolera colombiana, destacando su impacto positivo en la eficiencia operativa, la seguridad y la sostenibilidad. No obstante, desde una perspectiva crítica, se evidencia la necesidad de profundizar en los desafíos contextuales, normativos y organizacionales que limitan su implementación efectiva. Asimismo, se hace evidente la urgencia de desarrollar un marco normativo nacional específico que articule las buenas prácticas internacionales con la realidad del sector colombiano, promoviendo una adopción más homogénea, sostenible y estratégica del mantenimiento predictivo en la industria petrolera y, por extensión, en el sector industrial del país.

## 10. Conclusiones

A partir del proceso de recolección y análisis de la información suministrada en el cuerpo de la monografía, se generan las siguientes conclusiones:

- El mantenimiento predictivo conlleva una serie de etapas o fases que en su conjunto e implementación van a permitir por medio de un modelo especifico la detección temprana de fallas, y, por ende, la generación de alternativas de solución que lleven a la toma de decisiones que se ajusten a las necesidades de los equipos y prevenir en gran medida fallas o daños en los sistemas y estructuras petroleras. En efecto, la planeación dentro de un proyecto petrolero es crucial e indispensable, permitiendo tener una estructura que abarque los ejes funcionales del mismo dentro de la cadena de valor.
- En Colombia no existe una norma exclusiva y especifica que detalle los aspectos generales del mantenimiento predictivo ni en la industria petrolera ni en cualquier otro sector, lo que refleja la ausencia de un marco normativo sólido y un vacío legislativo que debilita el accionar de las organizaciones industriales, debido a que no operan bajo el fundamento de una norma establecida. Por otra parte, es de mencionarse que se cuenta con una serie de normas vagas que dan cuenta acerca de los procesos de mantenimiento, la prevención y la seguridad en el contexto laboral.
- A nivel internacional se identificaron normas ISO que se enfocan y detallan ampliamente los aspectos que soportan al mantenimiento predictivo, técnicas, modelos y demás, lo que refleja un sistema estructurado conforme a las necesidades del sector económico y que favorece no solo su locación, sirviendo como un referente a nivel mundial.
- Las aplicabilidades del mantenimiento predictivo en la industria petrolera van a depender de los tipos de equipos y maquinas que se estén utilizando en las diferentes estructuras, así como la revisión y diagnóstico de estos van a requerir el uso de técnicas específicas que se asocien con su funcionabilidad. No obstante, de acuerdo a la literatura los resultados de la utilización del

mantenimiento predictivo mejora ampliamente la eficacia de los equipos y reduce costos 10 veces más que otro tipo de mantenimiento.

- La revisión de la literatura dejó en evidencia la mínima cantidad de investigaciones que se enfocan en el estudio práctico de la ejecución del mantenimiento predictivo en equipos cuyas condiciones son críticas, encontrándose muchos más estudios de tipo revisión documental y de la bibliografía, pero que siendo así son muy pertinentes conforme los objetivos que se plantean.

## 11. Recomendaciones

- Se recomienda la adopción de una norma internación técnica que sirva como un estándar obligatorio para la implementación del mantenimiento predictivo en la planeación y materialización de cualquier proyecto de tipo petrolero, pero que al mismo tiempo funcione como un sustento para otro sector industrial que lo requiera.
- A nivel político y económico se considera la consolidación de mesas de trabajo lideradas por las principales entidades gubernamentales y del sector petrolero y económico, con la finalidad de propiciar la creación de una norma nacional que defina y establezca el procedimiento de aplicación del mantenimiento predictivo, tomando como referentes las normas técnicas internacionales ISO.
- En el contexto de la investigación se recomienda el aumento proactivo de proyectos de corte cuantitativos que permitan la medición y evaluación frente a la implementación del mantenimiento predictivo en la industria petrolera con énfasis en la intervención de equipos o maquinaria en estado crítico, buscando construir conocimiento confiable que sirva de fundamento para las operaciones internas y externas de dicho sector.

## Referencias bibliográficas


Acurio Masabanda, R. T. (2025). *Diseño de un plan de control de riesgos mecánicos de caída de objetos de altura de una torre de perforación de la empresa SIMOPETRO* (Master's thesis, Quito, Ecuador: UISRAEL). http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/4275

Afuera, C. (2021). *Uso de Bombeo Multifásico en la Extracción de Crudo Pesado y Extrapesado en Instalaciones* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO). https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000812214/3/0812214.pdf

Agencia Nacional de Hidrocarburos (2025). Sector colombiano del petróleo y el gas. Agencia Nacional de Hidrocarburos – Energía. https://www.anh.gov.co/es/hidrocarburos/oportunidades-disponibles/procesosde-seleccion/ronda-colombia-2010/anh/sector-colombiano-del-petr%C3%B3leo-y-el-gas/

Alvarado Beltrán, D. S., & Longo Meneses, F. E. (2024). *Mantenimiento 4.0: diseño de modelo predictivo para la definición de estrategias de mantenimiento en la industria oíl & gas.* (Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y A Distancia UNAD). Repositorio Institucional Universidad Nacional Abierta y A Distancia UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13399

Andino Vásquez, D. C. (2025). *Mantenimiento predictivo en equipos rotativos utilizando análisis de vibraciones y modelos de supervivencia con Machine Learning* (Master's thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2025). Repositorio Institucional Universidad de las Américas. https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/17578

Ballén Cárdenas, F. (2017). *Análisis de la implementación de un modelo de mantenimiento predictivo a equipos de superficie en una facilidad de producción de petróleo*. (Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y A

Distancia UNAD). Repositorio Institucional Universidad Nacional Abierta y A Distancia UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13399

Betancourt Campusano, I. (2023). Comentarios sobre la industria petrolera en Colombia. Universidad del Norte. https://manglar.uninorte.edu.co/calamari/bitstream/handle/10738/3752/P-40-0146-00-10.pdf?sequence=1

Bonifaz, L. A. H., Sañay, F. R. M., Escobar, D. M. G., & López, R. C. C. (2020). La gestión de procesos en la industria: El caso de la industria petrolera. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, *5*(2), 395-411. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7435314

Cano Suarez, D. F. (2024). *Tendencias tecnológicas de inspección enfocadas en la industria petrolera*. (Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y A Distancia UNAD). Repositorio Institucional Universidad Nacional Abierta y A Distancia UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13399

Cervantes, M. Y., Casanova, R. P., & Loría, J. Z. (2019). Aplicabilidad de la criticidad en el mantenimiento de equipos. *Project Design and Management*, *1*(1). https://www.mlsjournals.com/Project-Design-Management/article/view/168

Diaz Granados SPP; MER, Cárdenas MER Ing-N. Álvarez (2024*). ACCIONES IMPLEMENTADAS EN LA OPTIMIZACION DE PLANES DE INSPECCION DE EQUIPOS ESTATICOS Y SU EJECUCION EN PARADAS DE PLANTA*. [Sesión de Congreso]. XXVI Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos. Bogotá, Colombia. https://cimga.com/Web/2024/Trabajos/2024-030.pdf

EALDE Business School (2020). Proyectos petroleros: etapas para su ejecución. EALDE Business School. https://www.ealde.es/proyectos-petroleros-etapas-ejecucion/

Faneite, S. F. A. (2023). Los enfoques de investigación en las Ciencias Sociales. *Revista Latinoamericana Ogmios*, *3*(8), 82-95. https://idicap.com/ojs/index.php/ogmios/article/view/226

Gutiérrez Quiñónez, T. V., Reyes, V. M., Lugo Bustillos, J. K., García Bustillos, M. A., & Sequera Morales, A. G. (2024). Planeación de la Responsabilidad Social en una empresa petrolera: un caso de estudio en Ecuador. *Prohominum. Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, *6*(3), 232-242. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S2665-01692024000300232&script=sci_arttext

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Editiones – Interamericana Editores, México D.F. https://www.academia.edu/download/64312353/Investigacion_Rutas_cualitativa_y_cuantitativa.pdf

Infante Gómez, P. (2023). *Modelo para el mantenimiento predictivo de segmentos especiales de vía.* (Trabajo de grado, Universidad de Cantabria). Repositorio Institucional Universidad de Cantabria. https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/29572

Jácome Pérez, Á. L., & Pérez Wuillemier, G. E. (2020). *Modelo de Gestión para la Planeación y Ejecución de las Inversiones de Mantenimientos Mayores en los Campos de Producción de Petróleo y Gas de la Vicepresidencia de Desarrollo y Producción Regional Central de Ecopetrol SA*. (Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Bucaramanga). Repositorio Institucional Universidad Autónoma de Bucaramanga. https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/11664

J-ROHI Ingeniería S.A.S. (2016). Equipos esenciales para la industria petrolera: impulsando la extracción y el procesamiento eficiente. J-ROHI Ingeniería S.A.S. https://j-rohi.com/equipos-esenciales-para-la-industria-petrolera-impulsando-la-extraccion-y-el-procesamiento-eficientes/

Medina, R. (2022). Tipos de mantenimiento en las unidades de medición de producción de pozos petroleros. *Revista Enfoques*, *6*(21), 37-49. https://revistaenfoques.org/index.php/revistaenfoques/article/view/124/891

Molina Salgado, J. L., López Sánchez, M., Santaolaya Salgado, R., & Castro Sánchez, N. A. (2024). Preprocesamiento de datos en el pronóstico de fallos de rodamientos para el mantenimiento predictivo. *Computación y Sistemas*, *28*(4), 1811-1821. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-55462024000401811&script=sci_arttext

Morphy, L. V. (s.f.). *Inteligencia Artificial para Toma de Decisiones en el Mantenimiento Predictivo a equipos Turbocompresores en la Industria Petrolera.* (Trabajo de grado, Universidad de Oriente). Repositorio Institucional Universidad de Oriente. https://www.academia.edu/download/69023763/Inteligencia_Artificial_para_Toma_de_Decisiones_en_el_Mantenimiento_Predictivo_a_equipos_Turbocompresores.pdf

Moscoso Jacome, R. E. (2017). Programa de control del mantenimiento proactivo y correctivo en equipos mecánicos del transporte de hidrocarburos en el Ecuador. (Trabajo de grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Repositorio Institucional Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://eventosindustrial.unmsm.edu.pe/upg_old/archivos/TESIS2018/DOCTORADO/tesis8.pdf

Olarte, W., Arbeláez, M. B., & Zabaleta, B. C. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et technica*, *2*(45). https://ojs2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/355

Oruna, J. C. (2012). La industria de refinación de petróleo en el Perú. *Paradigmas*, *4*(1). https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Paradigmas/article/view/551

Paredes, R. (2020). Tipos de mantenimiento aplicados en la industria petrolera venezolana de la Región Occidente. *Revista Ingeniería*, *4*(9), 129-142. https://www.revistaingenieria.org/index.php/revistaingenieria/article/view/62/117

QUIROGA, F. O. B. (2023). *MODELO DE PLANEACIÓN INTEGRADA DE PROYECTOS PETROLEROS DE PERFORACIÓN* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO). Repositorio Institucional Universidad Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000847498/6/0847498.pdf

Rosales, J. (2023). Normas ISO importantes en la Gestión del Mantenimiento. FRACTTAL. https://www.fracttal.com/es/mantenipedia/que-son-las-normas-iso#:~:text=Normas%20ISO%20relacionadas%20al%20mantenimiento%20de%20activos,%2D%20Diagn%C3%B3sticos%20y%20condici%C3%B3n%20de%20un%20sistema.

Soto, J. J. L. (2021). Gestión de mantenimiento en las gerencias de perforación y rehabilitación de la industria petrolera. *PANEL: Revista de Administración y Economía*, *3*(2), 35-45. https://scholar.archive.org/work/mzzmujff3bgybosvikcdctx5nu/access/wayback/https://revistapanel.org/index.php/panel/article/download/672/1804

Sterling Thermal Technology (2024). Las plataformas petrolíferas más grandes y cómo funcionan. Sterling Thermal Technology. https://www.sterlingtt.com/2024/01/23/the-largest-oil-rigs-how-they-work/

Tapia, S., Aguilera, G., Rojas, L., & García, J. (2024). Mantenimiento predictivo basado en machine learning: una revisión sistemática de la literatura y perspectivas en la industria 4.0. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, *15*(4), 63-93. https://acijournal.cl/index.php/ojs/article/view/3/51

Tufiño, A. E. R., Solano, S. J. N., & Jácome, R. E. M. (2020). Modelo de gestión para el control de riesgos en oleoductos, poliductos y gasoductos. *Industrial data*, *23*(1), 73-94. https://www.redalyc.org/journal/816/81664593005/81664593005.pdf

Velasquez, J. M., & Alexander, J. (2018). *Aplicación de RCM como estrategia de implementación del mantenimiento predictivo para la metodología*

*TPM.* (Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. https://www.academia.edu/download/59101270/Aplicacion_RCM_nacional_201820190501-58581-12b7b4s.pdf

Villegas, L., & Pérez, R. Inteligencia Artificial para Toma de Decisiones en el Mantenimiento Predictivo a equipos Turbocompresores en la Industria Petrolera. *researchgate. net,. researchgate. net*. https://www.researchgate.net/profile/Leonardo-Villegas-Morphy/publication/371008558_Artificial_Intelligence_for_Decisions_Making_in_Predictive_Maintenance_to_Turbocompressors_Equipment_in_the_Oil_Industry/links/646ec6c86a0082273fa8982c/Artificial-Intelligence-for-Decisions-Making-in-Predictive-Maintenance-to-Turbocompressors-Equipment-in-the-Oil-Industry.pdf