



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA

VIGILADA MINEUCACIÓN - SNIES 1732

Misión Académica Internacional

Mantenimiento predictivo inteligente en
estaciones de transporte de
hidrocarburos en Colombia

30
Años
Memoria que trasciende



Contenido

Lista de tablas	3
Lista de figuras	3
Resumen	4
1. Introducción	6
2. Planteamiento del problema	7
3. Justificación	8
4. Objetivos	10
4.1 Objetivo general	10
4.2 Objetivos específicos	10
5. Alcance y delimitación	10
6. Marco teórico y estado del arte	11
6.1 Gestión de activos y ciclo de vida	11
6.2 Gestión de mantenimiento	12
6.3 Mantenimiento predictivo e inteligente	12
6.4 Tecnologías habilitadoras	13
6.5 Estado del arte internacional	14
6.6 Evidencia documental colombiana	15
6.7 Vacíos de investigación y postura crítica	15
7. Metodología	16
7.1 Fases metodológicas	17
8. Resultados del análisis comparativo	19
8.1 Clasificación de la revisión bibliográfica	19
8.2 Comparativo México-Colombia	21
8.3 Matriz tecnológica	24
8.4 Brechas y riesgos	26
9. Estrategia de implementación propuesta	28

1996/2026
Memoria que trasciende

9.1 Arquitectura conceptual	28
9.2 Hoja de ruta	29
9.3 Indicadores propuestos	30
10. Resultados esperados	31
11. Conclusiones y recomendaciones	32
Referencias	33
Anexos	35

Lista de tablas

Tabla 1. Síntesis de información del anteproyecto inicial incorporada en el documento desarrollado
Tabla 2. Matriz de coherencia objetivos-metodología-productos
Tabla 3. Clasificación de fuentes por aporte al proyecto
Tabla 4. Comparativo México-Colombia
Tabla 5. Matriz tecnológica para mantenimiento predictivo inteligente
Tabla 6. Matriz de brechas y riesgos
Tabla 7. Hoja de ruta de implementación
Tabla 8. Indicadores propuestos para seguimiento del piloto

Lista de figuras

Figura 1. Comparativo de madurez y oportunidad México-Colombia
Figura 2. Priorización de tecnologías habilitadoras
Figura 3. Priorización de brechas/riesgos de implementación
Figura 4. Línea base conceptual vs meta de piloto predictivo

1996/2026
Memoria que trasciende

Resumen

El presente informe desarrolla una propuesta de sistematización de experiencias derivada de la Misión Académica Internacional en México, orientada a analizar la aplicabilidad del mantenimiento predictivo inteligente en estaciones de transporte de hidrocarburos en Colombia. El enfoque se da en la gestión de activos físicos críticos, integrando inteligencia artificial, sensores IoT/IIoT, sistemas SCADA, EAM/CMMS, modelos de Machine Learning y tableros de indicadores para fortalecer la confiabilidad, la disponibilidad y la toma de decisiones basada en datos (Póvoas et al., 2025; Ruiz Rodríguez et al., 2025; Samatas et al., 2021; Zheng et al., 2020).

La metodología propuesta se compone por cinco fases: consolidación de la experiencia de la misión, sistematización de la información, revisión bibliográfica, comparación México – Colombia y formulación de la estrategia de implementación. Este diseño se alinea con el anteproyecto inicial cuyo planteamiento presenta la sistematización de la experiencia con énfasis en IA, IoT, SCADA, analítica predictiva y gestión de activos, todo esto articulado con referentes técnicos de confiabilidad y ciclo de vida del activo (Dimitrov Diaz, 2026; ISO, 2016; ISO, 2024).

Tabla 1. Síntesis de información del anteproyecto inicial incorporada en el documento desarrollado

Elemento del anteproyecto inicial	Información base incorporada	Desarrollo en el informe final
Enfoque de la opción de grado	Sistematización de experiencias de la Misión Académica Internacional, haciendo énfasis en Inteligencia Artificial, datos, innovación y transferencia de aprendizajes.	El informe desarrolla una propuesta de análisis conceptual que transfiere los aprendizajes de la misión hacia el mantenimiento predictivo inteligente en estaciones de transporte de hidrocarburos en Colombia.

1996/2026
Memoria que trasciende

Tema y problema de investigación	Necesidad de fortalecer la gestión de activos críticos frente a obsolescencia tecnológica, información dispersa, baja trazabilidad histórica y dificultad para anticipar fallas.	El problema se replantea desde la gestión de activos, integrando operación, mantenimiento, condición, confiabilidad, criticidad, riesgo y toma de decisiones basada en datos.
Pertinencia y justificación	Aplicación de tecnologías predictivas como oportunidad para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y desempeño de los activos críticos.	La justificación se fortalece con literatura técnico – científica y las normas aplicables, resaltando que la IA, IIoT, SCADA y analítica no son fines aislados, sino habilitadores de la gestión del ciclo de vida del activo.
Objetivos y metodología	Los objetivos están orientados a caracterizar tecnologías, comparar la experiencia México – Colombia e identificar oportunidades de implementación.	El informe articula los objetivos con una metodología cualitativa, documental, descriptiva y comparativa, organizada en cinco fases: misión académica, sistematización, revisión bibliográfica, comparativo México – Colombia y propuesta de implementación.
Aplicación en Colombia	Estaciones de bombeo, rebombeo y almacenamiento de hidrocarburos, con enfoque en activos críticos para el proceso como bombas, motores, variadores, transformadores, instrumentación, válvulas y sistemas de control y supervisión.	La aplicación se concreta mediante una estrategia conceptual para un futuro piloto, priorizando los activos críticos, variables de monitoreo, integración de SCADA – EAM/CMMS, sensores, ciberseguridad e indicadores de desempeño.
Resultados y aporte esperado	Identificación de oportunidades para implementar el mantenimiento predictivo inteligente en estaciones de bombeo con brechas tecnológicas o de información.	El informe entrega una matriz tecnológica, comparativo México – Colombia, matriz de brechas y riesgos, arquitectura conceptual, hoja de ruta e indicadores para orientar un futuro piloto.

Fuente: elaboración propia.

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

Palabras clave: mantenimiento predictivo inteligente; estaciones de bombeo; transporte de hidrocarburos; inteligencia artificial; IoT; SCADA; analítica predictiva; gestión de activos.

1. Introducción

El transporte de hidrocarburos en Colombia exige continuidad operacional, trazabilidad, seguridad de proceso y capacidad de respuesta ante desviaciones. Las estaciones de bombeo, rebombeo y almacenamiento concentran activos críticos como bombas, motores eléctricos, variadores de frecuencia, transformadores, instrumentación, sistemas contra incendio y plataformas de supervisión y control; por tanto, su gestión debe alinearse con valor, riesgo, desempeño y ciclo de vida. La indisponibilidad de estos activos puede impactar el cumplimiento del programa de transporte, los costos de mantenimiento, la seguridad operacional y el impacto ambiental. (ISO, 2014; ISO, 2024; Ruiz Rodríguez et al., 2025).

La transformación digital permite complementar el mantenimiento preventivo tradicional (preventivo y correctivo) con estrategias predictivas basadas en datos. Con este enfoque, junto con los sensores IIoT, sistemas SCADA, históricos de mantenimiento confiables, modelos de aprendizaje automático y tableros visuales de indicadores permiten identificar tendencias, detectar anomalías y dar prioridad a intervenciones basados en datos, antes que las fallas se presenten y afecten la operación (Samatas et al., 2021; Zheng et al., 2020; Lazo, 2024).

Desde la gerencia de mantenimiento y gestión de activos, la tecnología no debe entenderse como un fin en sí mismo, sino como un medio para mejora equilibrio entre valor, riesgo, desempeño y ciclo de vida. En ese sentido, el mantenimiento predictivo inteligente se propone como una estrategia que transforma datos operativos y de condición en decisiones técnicas y gerenciales.

1996/2026

Memoria que trasciende

Esta perspectiva responde a los principios de la gestión de activos establecidos por ISO 55000 e ISO 55001 y a la necesidad de estructurar datos confiables de activos, fallas e intervenciones según ISO 14224 (ISO, 2016, 2024a, 2024b).

La Misión Académica Internacional en México permitió observar aplicaciones de inteligencia artificial, ciencia de datos e innovación en contextos académicos, educativos e investigativos. Aunque el foco observado no fue exclusivamente industrial, el aprendizaje transferible consiste en usar datos confiables, criterio técnico y validación humana para soportar decisiones, lo cual es coherente con las oportunidades de mantenimiento inteligente identificadas para activos industriales en Colombia (Dimitrov Díaz, 2026; Mendoza, 2026).

2. Planteamiento del problema

En el contexto industrial colombiano, las estaciones de transporte de hidrocarburos operan con activos físicos críticos cuya falla puede comprometer la disponibilidad del sistema, el cumplimiento del programa de bombeo, la seguridad operativa, la eficiencia energética y los costos de mantenimiento. La coexistencia de equipos modernos con equipos antiguos y registros de mantenimiento incompletos dificulta la anticipación de fallas. La literatura reciente muestra que la IA y la analítica predictiva en Oil & Gas tienen potencial para apoyar disponibilidad, seguridad y optimización de mantenimiento, si se gestionan datos, gobernanza y adopción tecnológica (Póvoas et al., 2025; Sánchez Salcedo, 2025).

En algunas instalaciones se observan brechas como obsolescencia tecnológica, equipos sin información de fábrica, placas ilegibles o inexistentes, bajo historial técnico, registros dispersos entre operación y mantenimiento, integración parcial entre SCADA y EAM/CMMS. Esto limita la trazabilidad de eventos, modos de falla y tiempos de intervención, reduciendo la capacidad de

1996/2026
Memoria que trasciende

anticipar fallas y priorizar mantenimientos. Por ello ISO 14224 es clave para estructurar datos de activos, fallas, causas e intervenciones (ISO, 2016; Ruiz Rodríguez et al., 2025; Torres Martínez, 2024).

El problema no es solo la ausencia de algoritmos de IA, sino la falta de una arquitectura de gestión de activos que conecte operación, mantenimiento, condición, confiabilidad, criticidad y riesgo. La analítica en Oil & Gas puede mejorar mantenimiento, seguridad y eficiencia, pero enfrenta retos de calidad de datos, sistemas heredados, talento, gobernanza, explicabilidad y confianza. Además, al conectar OT, SCADA, IIoT y plataformas de datos, la ciberseguridad debe incorporarse desde el diseño (Bbhamare et al., 2020; Cummins et al., 2024; IEC, 2024; Póvoas et al., 2025).

El problema de investigación queda planteado de la siguiente manera: ¿cómo pueden transferirse los aprendizajes de la Misión Académica Internacional en México y la evidencia técnica sobre IA, IIoT, SCADA y analítica predictiva hacia una estrategia conceptual del mantenimiento predictivo inteligente para estaciones de transporte de hidrocarburos en Colombia? En esta pregunta se articula la experiencia internacional con la necesidad local de gestión de activos, confiabilidad y transformación digital. (Dimitrov Díaz, 2026; Mendoza, 2026; Ruiz Rodríguez et al., 2025).

3. Justificación

El proyecto es pertinente para la Especialización en Gerencia de Mantenimiento y Gestión de Activos porque combina la transformación tecnológica, el ciclo de vida del activo, la confiabilidad, del riesgo y la toma de decisiones con datos. El mantenimiento que predice con ayuda de IA ayuda a pasar de los planes preventivos rígidos y correctivos no planeados a mantenimientos

1996/2026
Memoria que trasciende

basados en la condición, desempeño y valor del activo ISO 55000/55001 (ISO, 2014; Zheng et al., 2020).

Desde el estado del arte, se encuentran antecedentes que demuestran la viabilidad del enfoque. Los investigadores en Colombia documentaron prototipos de KPI con las alertas inteligentes en el área de transporte de hidrocarburos, estudios de IA aplicada al mantenimiento, analítica de datos en empresas del sector y metodologías de mantenimiento predictivo con Machine Learning aplicadas a activos eléctricos. (Alvarez Quiñones et al., 2022; Ruiz Rodríguez et al., 2025; Sánchez Salcedo, 2025; Torrez Martinez, 2024).

Estos antecedentes muestran que la adopción tecnológica no depende solo de seleccionar algoritmos o plataformas digitales, sino que también requiere inversión, integración de sistemas, calidad de datos, capacitación, ciberseguridad y cultura organizacional orientada al uso de información confiable. Por ello, la propuesta aporta valor técnico al anticipar fallas y optimizar intervenciones, valor gerencial al soportar decisiones de inversión, priorización y desempeño, y valor estratégico al conectar la misión internacional con oportunidades reales de transformación digital en Colombia (Póvoas et al., 2025; Samatas et al., 2021; Sánchez Salcedo, 2025).

La propuesta puede aportar valor en tanto que no se limita a describir tecnologías, sino en proponer una ruta de implementación desde la gestión de activos. El enfoque prioriza datos confiables, taxonomía de activos y fallas, integración SCADA-EAM, ciberseguridad, OT, validación humana y medición de indicadores. Así, la IA se convierte en un habilitador de decisiones de mantenimiento alineadas con ISO 55000/55001, NFPA 70B e IEC 62443 (IEC, 2024; ISO, 2016, 2024; NFPA, 2023).

1996/2026
Memoria que trasciende

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Analizar la implementación del mantenimiento predictivo inteligente en estaciones dedicadas al transporte de hidrocarburos en Colombia, mediante la integración de la sistematización de la Misión Académica Internacional en México y la literatura técnico – científica, para proponer una estrategia de gestión de activos que se apoya en datos, inteligencia artificial, IoT, SCADA y analítica predictiva para la toma de decisiones.

4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar las tecnologías, plataformas y modelos analíticos aplicables al mantenimiento predictivo inteligente en estaciones de transporte de hidrocarburos.
2. Comparar los aprendizajes obtenidos durante la Misión Académica Internacional en México con aplicaciones documentadas y brechas en el contexto colombiano.
3. Formular una estrategia conceptual de implementación para estaciones dedicadas al transporte de hidrocarburos, priorizando activos críticos, indicadores y riesgos.

5. Alcance y delimitación

En el planteamiento se hace un anteproyecto de análisis conceptual. No se busca validar un modelo predictivo con datos reales de una estación concreta; lo que se quiere es ofrecer una estructura para la base técnica de un piloto futuro. La unidad de análisis son las estaciones de bombeo, de rebombeo y de almacenamiento que forman parte del sistema de transporte de hidrocarburos de Colombia. Los activos críticos que se priorizan son las bombas, los motores,

los variadores, la instrumentación, las válvulas de seguridad y los sistemas de supervisión y control.

El alcance comprende la revisión de la bibliografía, la comparación entre México y Colombia, la clasificación de las tecnologías, la identificación de las brechas y la formulación de la estrategia. El alcance no incluye pruebas de campo, la programación de modelos reales, sugerencias de equipos ni cálculos financieros detallados de la inversión.

6. Marco teórico y estado del arte

6.1 Gestión de activos y ciclo de vida

La gestión de activos orienta las decisiones sobre activos físicos a maximizar valor, equilibrando desempeño, riesgo y costo durante todo el ciclo de vida. En estaciones de bombeo, este enfoque exige conectar estrategia, operación, mantenimiento, confiabilidad, seguridad, sostenibilidad y decisiones de inversión. ISO 55000:2024 aporta vocabulario, principios y visión general; ISO 55001:2024 define los requisitos para implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de activos (ISO, 2024a, 2024b).

Para que la gestión predictiva sea viable, la información debe ser confiable, trazable y comparable entre operación, mantenimiento e ingeniería. En petróleo, gas natural y petroquímica, ISO 14224:2016 establece una base para recolectar e intercambiar datos de confiabilidad y mantenimiento durante el ciclo de vida operacional de los equipos. Esta norma estructura datos de equipo, fallas e intervenciones, incluyendo taxonomía, causas consecuencias, acciones, recursos y tiempos de parada (ISO, 2016).

1996/2026

Memoria que trasciende

6.2 Gestión de mantenimiento

En la gestión de mantenimiento, un EAM/CMMS como SAP PM o IBM Maximo permite estructurar avisos, órdenes de trabajo, planes, costos, repuestos, historial de fallas y tiempos de intervención. Esta información es fundamental para controlar la ejecución, documentar el desempeño de los activos y soportar indicadores como disponibilidad, MTBF, MTTR, cumplimiento de planes y costos de mantenimiento (ISO, 2016; Ruiz Rodríguez et al., 2025).

Para avanzar hacia una gestión predictiva, el EAM/CMMS debe integrarse con SCADA, historiadores, sensores IoT/IIoT y tableros BI. Esta integración permite relacionar condición operacional, fallas, intervenciones, criticidad y costos, convirtiendo los datos en alertas, prioridades y decisiones trazables de mantenimiento. Así, la gestión deja de centrarse únicamente en registrar lo ocurrido y pasa a anticipar riesgos, optimizar intervenciones y mejorar la confiabilidad de los activos (Ruiz Rodríguez et al., 2025; Sánchez Salcedo, 2025).

6.3 Mantenimiento predictivo e inteligente

El mantenimiento predictivo utiliza datos históricos, variables de condición y modelos analíticos para anticipar fallas, degradación o necesidades de intervención, a diferencia del mantenimiento preventivo basado en calendario, busca intervenir con base en la condición real del activo, reduciendo paradas no programadas, mejorar la confiabilidad y optimizar el uso de recursos técnicos y económicos. La literatura lo reconoce como una estrategia clave en entornos de industria 4.0, especialmente cuando se combina con sensores, analítica y aprendizaje automático (Krupitzer et al., 2020; Lazo, 2024; Zhu et al., 2019).

1996/2026
Memoria que trasciende

El mantenimiento inteligente amplía el enfoque predictivo al integrar IIoT, aprendizaje automático, repositorios de datos, visualización, validación humana y mejora continua de modelos. Zheng et al. (2020) plantean que este enfoque combina sensores inteligentes, big data, modelos de confiabilidad y herramientas digitales para fortalecer la toma de decisiones. Samatas et al. (2021) destacan que IoT y Machine Learning permiten transformar datos de sensores en alertas y acciones de mantenimiento.

En activos rotativos, como bombas y motores, las variables de vibración, temperatura, corriente eléctrica, presión, caudal y energía permiten construir señales tempranas de falla. En sistemas eléctricos, como transformadores y variadores, la analítica de condición puede detectar desviaciones térmicas, eléctricas o de carga antes de la falla funcional (Alvarez Quiñones et al., 2022; Gawde et al., 2022).

6.4 Tecnologías habilitadoras

Las tecnologías habilitadoras del mantenimiento predictivo inteligente incluyen sensores IoT/IIoT, SCADA/HMI, protocolos industriales, historiadores, bases de datos, nubes industriales, EAM/CMMS, modelos de Machine Learning, tableros BI y gemelos digitales. Estas herramientas permiten capturar datos de condición, integrarlos con información operacional y de mantenimiento, generar alertas y apoyar decisiones sobre activos críticos. Sin embargo, su adopción debe ser progresiva: primero calidad, trazabilidad e integración de datos; luego analítica predictiva y escalamiento de modelos avanzados (Póvoas et al., 2025; Samatas et al., 2021; Zheng et al., 2020).

Estas tecnologías deben organizarse por capas: campo, conectividad, gestión de datos, analítica, visualización, decisión y mejora continua. En la capa de campo se ubican sensores, instrumentos y equipos críticos; en conectividad, protocolos industriales y redes OT; en datos, historiadores, bases y nube; en analítica, modelos de Machine Learning; y en decisión, BI, EAM/CMMS y validación humana. Esta arquitectura evita implementar herramientas aisladas y permite transformar señales de operación en decisiones trazables de mantenimiento (Meindl & Mendonça, 2021; Ruiz Rodríguez et al., 2025).

La ciberseguridad es una condición habilitante cuando se conectan activos de campo, sistemas de control, redes OT y plataformas de análisis. IEC 62443 debe considerarse en la segmentación de red, acceso remoto, gestión de usuarios, monitoreo de eventos y protección de la continuidad operacional. Sin este enfoque, la digitalización puede aumentar la exposición de SCADA, PLC, sensores y plataformas conectadas, a riesgos operacionales y de seguridad industrial (Bhamare et al., 2020; IEC, 2024).

6.5 Estado del arte internacional

En Oil & Gas, la literatura reciente evidencia aplicaciones de IA en optimización operacional, mantenimiento predictivo, monitoreo remoto, seguridad, análisis de imágenes y gestión de activos. Estas aplicaciones pueden transformar la operación del sector, pero enfrentan desafíos asociados con privacidad, explicabilidad, talento especializado, calidad de datos, sistemas heredados y adopción organizacional (Póvoas et al., 2025; Li et al., 2024).

Las revisiones internacionales también muestran que un modelo predictivo no es suficiente si los usuarios no comprenden ni confían en sus resultados. Por ello, la IA explicable es relevante para

1996/2026
Memoria que trasciende

facilitar validación humana, trazabilidad y aceptación operativa. Además, la convergencia OT/IT aumenta la exposición de SCADA, PLC y plataformas conectadas, por lo que la ciberseguridad debe incorporarse desde el diseño (Bhamare et al., 2020; Cummins et al., 2024; IEC, 2024).

6.6 Evidencia documental colombiana

La evidencia nacional muestra avances relevantes en analítica, IA aplicada al mantenimiento y tableros de control. Ruis Rodríguez et al. desarrollan un prototipo de KPI con alertas inteligentes para transporte de hidrocarburos, soportado por SCADA, IoT, Azure IoT Hub, SQL Server, Azure Data Factory, Python y Power BI. A su vez, Sánchez Salcedo identifica que la analítica de datos en hidrocarburos mejora la toma de decisiones, aunque exige inversión, integración, capacitación y ciberseguridad (Ruiz Rodríguez et al., 2025; Sánchez Salcedo, 2025).

Torrez Martínez sintetiza tendencias de IA aplicada a la gestión del mantenimiento, incluyendo IoT, redes neuronales, realidad aumentada y gemelos digitales. Alvarez Quiñones et al. demuestran, en el contexto eléctrico colombiano, que modelos de clasificación con Machine Learning pueden apoyar la priorización de mantenimiento predictivo en transformadores. Aunque este caso no pertenece a la industria de transporte de hidrocarburos, es transferible a activos críticos de estaciones (Alvarez Quiñones et al., 2022; Torres Martínez, 2024).

6.7 Vacíos de investigación y postura crítica

La revisión evidencia que gran parte de la literatura se concentra en algoritmos, sensores o herramientas específica, pero aborda con menor profundidad su integración con gestión de

1996/2026
Memoria que trasciende

activos, gobierno de datos, taxonomía de fallas, ciberseguridad OT y decisiones gerenciales. En Colombia, la evidencia pública se concentra en prototipos, estudios de analítica y casos puntuales, lo que abre una oportunidad para formular una estrategia progresiva en estaciones con distintos niveles de madurez digital (IEC, 2024; ISO, 2016, 2024; Krupitzer et al., 2020; Zhu et al., 2019).

Desde una postura crítica, el éxito del mantenimiento predictivo inteligente no depende únicamente de adquirir tecnología. Requiere una arquitectura confiable de información y decisión, con datos de calidad, responsables definidos, taxonomía de fallas, indicadores, validación humana y conexión con EAM/CMMS. Sin estos elementos, los modelos de IA pueden generar ruido, falsas alarmas, baja confianza operativa y limitada adopción organizacional (Cummins et al., 2024; ISO, 2016; Póvoas et al., 2025; Ruiz Rodríguez et al., 2025).

7. Metodología

La investigación se guía con un enfoque cualitativo – documental, descriptivo y comparativo. Se emplea la sistematización de experiencias para dar forma a los aprendizajes de la misión internacional y la revisión bibliográfica para compararlos con las aplicaciones y brechas del sector colombiano de hidrocarburos, siguiendo una lógica de transferencia conceptual y de formulación de estrategia (Dimitrov Díaz, 2026; Mendoza, 2026).

1996/2026
Memoria que trasciende

Tabla 2. Matriz de coherencia objetivos-metodología-productos

Objetivo específico	Fase metodológica	Actividades	Instrumentos	Producto esperado
1. Caracterizar tecnologías y modelos	Revisión bibliográfica y técnica	Buscar artículos, normas y casos; clasificar tecnologías por activo y aplicación	Matriz de artículos; matriz tecnológica	Estado del arte y selección de tecnologías habilitadoras
2. Comparar México–Colombia	Sistematización y comparación	Organizar aprendizajes de la misión; contrastar con aplicaciones colombianas y brechas industriales	Matriz comparativa; radar de madurez	Comparativo México–Colombia y oportunidades de transferencia
3. Formular estrategia conceptual	Diseño de propuesta	Definir arquitectura, fases, indicadores, riesgos y hoja de ruta	Matriz de brechas; roadmap; KPI	Estrategia de implementación para piloto predictivo

Fuente: elaboración propia.

7.1 Fases metodológicas

Fase 1. Revisión de la experiencia de misión

Se realiza revisión de notas, fotografías, conferencias, presentaciones y reflexiones técnicas de la Misión Académica Internacional en México. El análisis permite identificar conceptos transferibles al contexto industrial colombiano, como inteligencia artificial, analítica de datos, innovación, automatización, investigación aplicada y validación humana. Aunque la experiencia tuvo énfasis técnico y académico, aportó principios útiles para repensar la toma de decisiones en mantenimiento y gestión de activos.

1996/2026
Memoria que trasciende

Fase 2. Sistematización de la información

La información recolectada se organiza por categorías de análisis: aprendizaje observado, tecnología habilitadora, principio transferible, posible aplicación industrial, limitaciones y oportunidad en gestión de activos. Esta sistematización permite pasar de una descripción de la experiencia a una estructura técnica orientada a identificar oportunidades de mejora en el área de desempeño profesional.

Fase 3. Revisión bibliográfica

Se consultan artículos científicos, trabajos académicos, normas y fuentes técnicas sobre mantenimiento predictivo, IA, IoT, SCADA, analítica, RCM, RAM, FMEA, gemelos digitales e hidrocarburos. La selección se organiza según la pertinencia al objetivo, sector de aplicación, tecnología utilizada, aporte a gestión de activos y posibilidad de transferencia a estaciones de bombeo. Esta fase permite fundamentar la propuesta desde referentes técnicos, académicos y normativos (ISO, 2016; Póvoas et al., 2025; Samatas et al., 2021).

Fase 4. Comparación México–Colombia

Se compara los aprendizajes observados en México con aplicaciones documentadas en Colombia, identificando similitudes, diferencias, brechas y oportunidades de implementación. En México la IA se evidenció principalmente en entornos educativos, académicos e investigativos, en Colombia la oportunidad se orienta a estaciones de bombeo con oportunidades de optimización del mantenimiento apoyados en IA.

1996/2026
Memoria que trasciende

Fase 5. Formulación de estrategia

Se propone una hoja de ruta para implementar un piloto progresivo de mantenimiento en estaciones de bombeo. La estrategia integra gobierno de datos, arquitectura tecnológica, indicadores, gestión de riesgos, ciberseguridad, integración de SCADA – EAM/CMMS y validación humana. Su propósito es convertir datos operacionales y de mantenimiento en decisiones trazables para mejorar confiabilidad, disponibilidad y gestión de activos.

8. Resultados del análisis comparativo

8.1 Clasificación de la revisión bibliográfica

Alineado con el alcance del anteproyecto *Mantenimiento predictivo inteligente en estaciones de transporte de hidrocarburos en Colombia*, la revisión bibliográfica se clasificó a partir de criterios técnicos determinantes para la pertinencia, aplicabilidad y aporte de cada fuente consultada. Para conseguirlo, se consideraron variables como la implementación en el sector de hidrocarburos, el rigor técnico de la investigación, la aplicabilidad de los saberes adquiridos en la Misión Académica Internacional en México al contexto industrial colombiano, la pertinencia de las tecnologías IoT/IIoT, SCADA, EAM/CMMS, Machine Learning y tableros de indicadores, así como la contribución al cumplimiento de los objetivos del proyecto.

La clasificación ayudó a identificar los referentes clave. Con esos referentes se apoyó la evolución de los esquemas de mantenimiento. Primero tomando el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo y después se pasó a los modelos de mantenimiento predictivo inteligente. Los modelos de mantenimiento predictivo inteligente buscan mejorar la confiabilidad, la disponibilidad, la trazabilidad de la información y la toma de decisiones basada en los datos.

1996/2026

Memoria que trasciende

Todo eso se aplica en las estaciones de bombeo, en las estaciones de rebombeo y en las estaciones de almacenamiento de hidrocarburos. El archivo Excel muestra la matriz de análisis. En la matriz el archivo consolida las fuentes revisadas, el DOI o la URL, la tecnología asociada, el tipo de activo, la aplicabilidad, las limitaciones y el puntaje de prioridad. La información se basa en la literatura sobre inteligencia artificial, sobre analítica predictiva, sobre gestión de activos y sobre mantenimiento inteligente. (Alvarez Quiñones et al., 2022; Ruiz Rodríguez et al., 2025; Samatas et al., 2021; Zheng et al., 2020; Póvoas et al., 2025).

Tabla 3. Clasificación de fuentes por aporte al proyecto

Fuente	Año	Contexto	Tecnología / método	Uso en el proyecto	Puntaje
ISO 55000/55001	2014/2024	Internacional	Valor, alineación, liderazgo, aseguramiento	Estructura el proyecto como sistema de gestión de activos	25
ISO 14224	2016	Internacional	Taxonomía de activos, fallas y mantenimiento	Clave para estandarizar historial de fallas e intervenciones	25
Ruiz Rodríguez, Silva Jiménez & Moreno García	2025	Colombia	SCADA, Power BI, alertas inteligentes, KPI	Base para tablero de KPI y alertas de operación-mantenimiento	24
Póvoas et al.	2025	Internacional	IA, optimización, mantenimiento, seguridad	Aporta visión sectorial específica de Oil & Gas	23
IEC 62443	2018-2024	Internacional	Zonas, conductos, niveles de seguridad	Requerida para conectar IoT, nube y SCADA con gestión de riesgos	23

Sánchez Salcedo	2025	Colombia	Analítica de datos, estrategia digital	Sirve para brechas y estrategia de adopción en hidrocarburos	22
Mendoza	2026	Colombia	IA, gemelos digitales, END, transferencia internacional	Referencia directa para transferencia de prácticas internacionales	22
Samatas, Moungiakmas & Papakostas	2021	Internacional	IA, IoT, sensores, ML	Base para justificar sensores de vibración, temperatura y corriente	22
Zheng, Paiva & Gurciullo	2020	Internacional	IIoT, IA, big data, modelos probabilísticos	Soporta evolución a mantenimiento inteligente y ciclo de vida	22
Gawde et al.	2022	Internacional	Sensores, vibración, ML, diagnóstico multi-falla	Muy aplicable a bombas, motores y equipos rotativos	22

Fuente: elaboración propia.

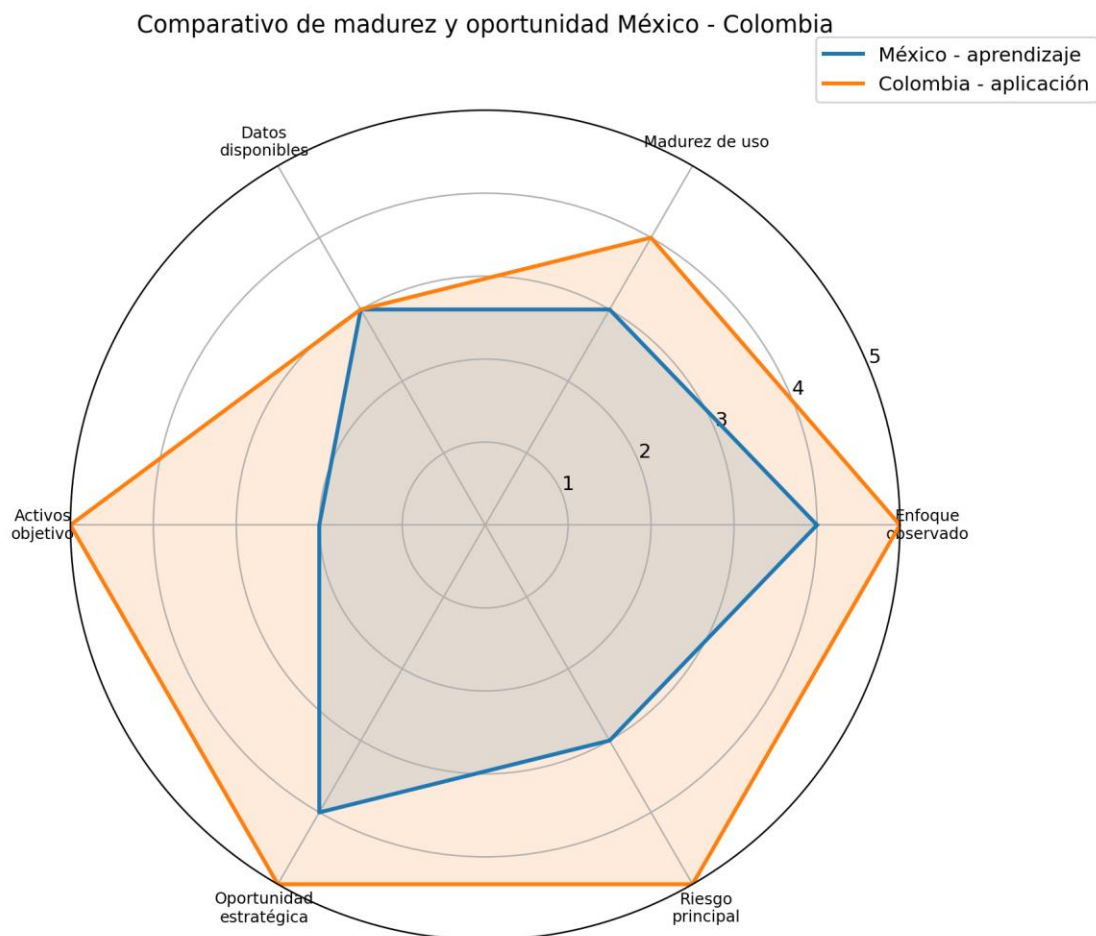
8.2 Comparativo México-Colombia

La comparación indica que México aporta aprendizajes de inteligencia artificial, innovación, análisis de datos e investigación aplicada. Colombia ofrece el campo de aplicación industrial en estaciones de transporte de hidrocarburos. La transferencia no copia casos, adapta principios de análisis, automatización, conocimiento experto y validación humana a los activos críticos del sector de hidrocarburos colombiano (Dimitrov Díaz, 2026; Mendoza, 2026; Póvoas et al., 2025).

1996/2026

Memoria que trasciende

Figura 1. Comparativo de madurez y oportunidad México-Colombia



Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de análisis comparativo y de priorización del proyecto.

Tabla 4. Comparativo México-Colombia

Criterio	México - misión académica	Colombia - aplicación industrial	Estrategia de transferencia
Enfoque observado	México: IA, innovación y datos en entornos académicos, educativos e investigativos	Colombia: aplicación industrial en transporte de hidrocarburos y estaciones de bombeo	El principio transferible es la toma de decisiones basada en datos y validación humana
Madurez de uso	México: alto potencial formativo y de investigación aplicada	Colombia: avances puntuales en SCADA, tableros, analítica y prototipos	Se requiere llevar aprendizajes académicos a pilotos industriales
Datos disponibles	México: datos de laboratorio, proyectos, conferencias y casos demostrativos	Colombia: datos operativos, SCADA, mantenimiento, energía y fallas, pero dispersos	La brecha principal es calidad, integración y trazabilidad del dato
Activos objetivo	México: casos de IA transversales y tecnología habilitadora	Colombia: bombas, motores, VFD, transformadores, válvulas, instrumentación y sistemas contra incendio	Definir taxonomía de activos críticos por ISO 14224
Oportunidad estratégica	México: inspiración, transferencia y aprendizaje metodológico	Colombia: piloto de mantenimiento predictivo inteligente en estación crítica	Crear hoja de ruta por fases con KPI y gobierno de datos
Riesgo principal	México: diferencia de contexto respecto a Oil & Gas	Colombia: obsolescencia, baja historia técnica, integración limitada y ciberseguridad OT	Implementar por pilotos controlados y madurez progresiva

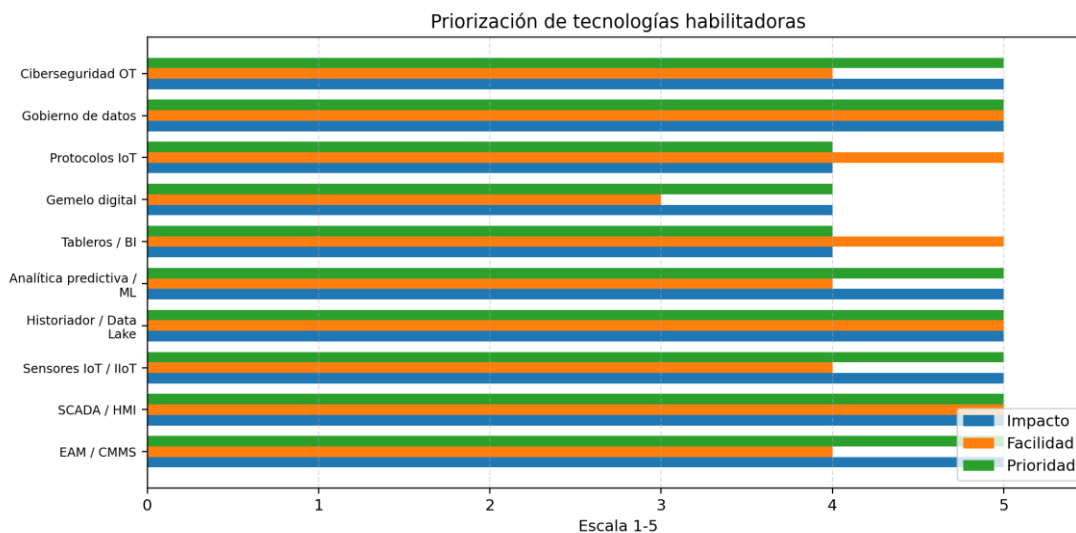
Fuente: elaboración propia.

1996/2026
Memoria que trasciende

8.3 Matriz tecnológica

La implementación se debe implementar por capas: inicialmente con datos confiables y gobernados, luego integrando fuentes y después empleando analítica predictiva, finalmente conectando con decisiones de intervenciones de mantenimiento o inversión y operación. Manteniendo esta secuencia se minimiza el riesgo al implementar modelos sin la información suficiente o sin la adopción operativa (ISO, 2016; Samatas et al., 2021; Zheng et al., 2020).

Figura 2. Priorización de tecnologías habilitadoras



Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de análisis comparativo y de priorización del proyecto.

Tabla 5. Matriz tecnológica para mantenimiento predictivo inteligente

Programa/plataforma	Aplicación	Norma aplicable	Aporte a gestión de activos	Prioridad
EAM / CMMS (SAP PM, IBM Maximo)	Gestiona órdenes de trabajo, planes, avisos, costos e historial de fallas	ISO 55001, ISO 14224	Integra mantenimiento con datos de condición y priorización por criticidad	5
SCADA / HMI (AVEVA, Honeywell Experion, FactoryTalk)	Supervisa presión, caudal, temperatura, alarmas y estados en tiempo real	IEC 62443, ISO 55001	Fuente principal de datos operativos para alertas y tendencias	5
Sensores IoT / IIoT (Vibración, temperatura, corriente, presión, energía)	Capturan datos de condición de bombas, motores, VFD y transformadores	ISO 17359, NFPA 70B	Habilitan monitoreo basado en condición y diagnóstico temprano	5
Historiador / Data Lake (SQL Server, Azure Data Factory, PI System)	Consolida SCADA, EAM, sensores y bases históricas	ISO 14224, IEC 62443	Permite trazabilidad, calidad de datos y preparación para ML	5
Analítica predictiva / ML (Python, R, Azure ML, modelos de anomalías)	Predice fallas, clasifica condiciones y estima RUL	RAM, RCM, FMEA	Anticipa intervenciones y reduce dependencia de mantenimiento calendario	5
Tableros / BI (Power BI, Tableau)	Visualiza MTBF, MTTR, disponibilidad, criticidad, costos y alertas	ISO 55001, TPM	Convierte datos técnicos en decisiones operativas y gerenciales	4

1996/2026
Memoria que trasciende

Gemelo digital (Modelos de activo o estación)	Simula escenarios de operación, condición y ciclo de vida	ISO 55000, RCM, RAM	Evalúa decisiones de mantenimiento, inversión y operación	4
Protocolos IoT (MQTT, OPC UA, AMQP, REST API)	Comunican campo, SCADA, nube y aplicaciones analíticas	IEC 62443	Aseguran interoperabilidad y escalabilidad de datos	4
Gobierno de datos (Catálogo, calidad, taxonomía, reglas de datos)	Define propietarios, formatos, trazabilidad y criterios de confiabilidad	ISO 14224, ISO 55001	Reduce datos dispersos y mejora confiabilidad del modelo predictivo	5
Ciberseguridad OT (Segmentación, acceso remoto seguro, hardening, monitoreo)	Protege sistemas de control y conectividad IIoT	IEC 62443	Condición habilitante para conectar sensores, nube y SCADA	5

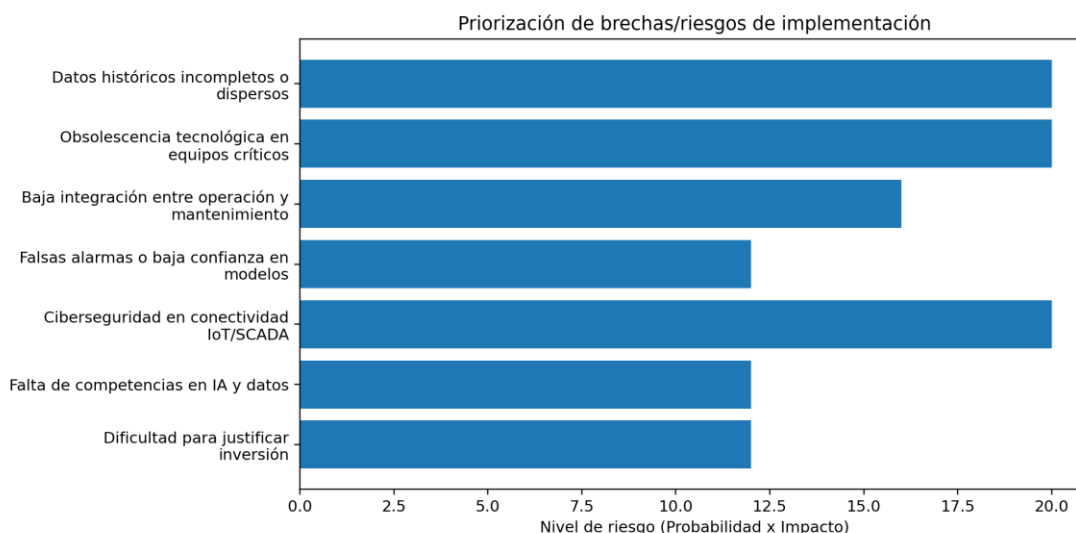
Fuente: elaboración propia.

8.4 Brechas y riesgos

Las brechas con más criticidad son: la calidad de los datos, la obsolescencia tecnológica o técnica, la integración de operaciones y mantenimiento, y la ciberseguridad OT. Estas brechas se deben asegurar antes de escalar a modelos predictivos, dado que la confiabilidad de su predicción depende de la calidad de los datos alimentados, la estabilidad de la arquitectura y la participación de especialistas en mantenimiento y operación (Bhamare et al., 2020; IEC, 2024; Krupitzer et al., 2020).

1996/2026
Memoria que trasciende

Figura 3. Priorización de brechas/riesgos de implementación



Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de análisis comparativo y de priorización del proyecto.

Tabla 6. Matriz de brechas y riesgos

Brecha / riesgo	Prob.	Impacto	Tratamiento propuesto	Nivel
Datos históricos incompletos o dispersos	5	4	Estandarizar taxonomía de activos, fallas y mantenimientos con ISO 14224	Crítica (20)
Obsolescencia tecnológica en equipos críticos	4	5	Priorización por criticidad, retrofit de sensores y plan de inversión por ciclo de vida	Crítica (20)
Baja integración entre operación y mantenimiento	4	4	Integrar SCADA, EAM y tableros BI con responsables definidos	Alta (16)

Falsas alarmas o baja confianza en modelos	3	4	Validación humana, XAI, umbrales, revisión de desempeño de modelos	Alta (12)
Ciberseguridad en conectividad IoT/SCADA	4	5	Segmentación OT, accesos seguros, IEC 62443 y pruebas de seguridad	Crítica (20)
Falta de competencias en IA y datos	3	4	Capacitación, células mixtas y documentación de modelos	Alta (12)
Dificultad para justificar inversión	3	4	Caso de negocio con disponibilidad, costos evitados, energía y riesgo	Alta (12)

Fuente: elaboración propia.

9. Estrategia de implementación propuesta

La estrategia que se recomienda es dar inicio con la implementación de un piloto de manera progresiva y que pueda ser escalable. Asimismo, se debe escoger una estación piloto, la cual debe seleccionarse por criticidad operacional, disponibilidad de información de los activos, variables de operación, riesgos de falla, impacto en el sistema de bombeo y posibilidad de captura en línea de variables de condición. La estrategia debe ser implementada en activos clasificados como críticos que impacten el proceso como motores, variadores, bombas y transformadores (ISO, 2016; ISO, 2024; Ruiz Rodríguez et al., 2025).

9.1 Arquitectura conceptual

- Capa de campo: sensores de vibración, temperatura, corriente, presión, caudal y energía en activos elegidos – priorizados.
- Capa de control: SCADA/HMI, PLC, historiador y alarmas operacionales.
- Capa de datos: repositorio estructurado con taxonomía de activos, eventos, fallas e intervenciones bajo ISO 14224 (ISO, 2016).

1996/2026
Memoria que trasciende

- Capa analítica: modelos de anomalías, clasificación de condición, reglas de negocio y estimación de riesgo.
- Capa de decisión: tableros Power BI, alertas inteligentes, recomendaciones y conexión con EAM/CMMS.
- Capa de gobierno: responsables, calidad de datos, ciberseguridad OT, validación humana, revisión de modelos y mejora continua (IEC, 2024; ISO, 2024).

9.2 Hoja de ruta

Tabla 7. Hoja de ruta de implementación

Fase	Horizonte	Actividades principales	Producto entregable	Indicador de avance
0. Preparación	0-1 mes	Delimitar estación piloto, activos críticos y fuentes de datos	Mapa de activos críticos, matriz de datos, alcance del piloto	Activos críticos definidos, responsables asignados
1. Diagnóstico y datos	1-2 meses	Auditar SCADA, EAM, historial de fallas, sensores e instrumentos	Inventario de variables, brechas de datos, taxonomía ISO 14224	% variables críticas disponibles; calidad de dato
2. Instrumentación e integración	2-4 meses	Instalar/validar sensores y conectar datos a repositorio confiable	Arquitectura de datos, conexiones SCADA/IoT/EAM, tablero inicial	Disponibilidad de datos, latencia, continuidad
3. Analítica predictiva	4-7 meses	Desarrollar modelos de anomalías, clasificación o RUL para activos priorizados	Modelo validado, alertas, matriz de reglas de negocio	Precisión, recall, reducción de falsas alarmas

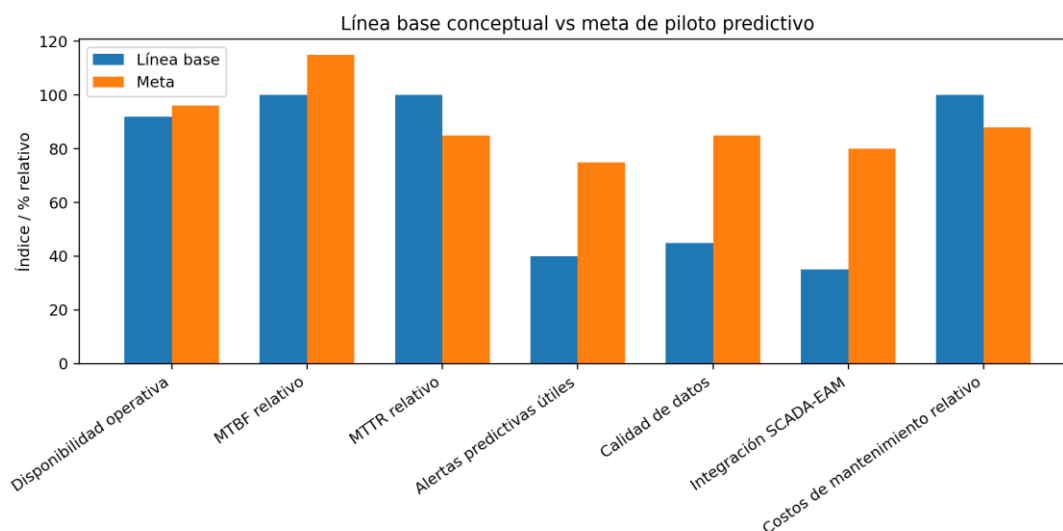
1996/2026
Memoria que trasciende

4. Piloto operativo	7-10 meses	Integrar alertas con decisiones de mantenimiento y revisión humana	Flujo de trabajo, recomendaciones de intervención, reporte de resultados	MTBF, MTTR, disponibilidad, costo evitado
5. Escalamiento	10-12 meses	Ajustar modelo y replicar en otras estaciones o familias de activos	Plan de expansión, lecciones aprendidas, caso de negocio	ROI, cobertura de activos, madurez digital

Fuente: elaboración propia.

9.3 Indicadores propuestos

Figura 4. Línea base conceptual vs meta de piloto predictivo



Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de análisis comparativo y de priorización del proyecto.

Tabla 8. Indicadores propuestos para seguimiento del piloto

1996/2026
Memoria que trasciende

Indicador	Línea base conceptual	Meta	Prioridad	Uso
Disponibilidad operativa	92	96	Alta	Mejorar continuidad del programa de bombeo
MTBF relativo	100	115	Alta	Aumentar tiempo medio entre fallas
MTTR relativo	100	85	Media	Reducir tiempo medio de reparación
Alertas predictivas útiles	40	75	Alta	Elevar calidad de alertas frente a mantenimiento correctivo
Calidad de datos	45	85	Crítica	Habilitar modelos confiables y trazabilidad
Integración SCADA-EAM	35	80	Crítica	Cerrar brecha entre operación y mantenimiento
Costos de mantenimiento relativo	100	88	Media	Reducir intervenciones no planificadas

Fuente: elaboración propia.

10. Resultados esperados

- Mapa de activos críticos para la continuidad operativa y variables mínimas requeridas de monitoreo para estaciones de bombeo, rebombeo y almacenamiento de hidrocarburos.
- Matriz de tecnologías habilitadoras que sean aplicables al mantenimiento predictivo inteligente.
- Comparativo México – Colombia evidenciando aprendizajes equiparables y brechas industriales.

1996/2026
Memoria que trasciende

- Hoja de ruta conceptual para la implementación de un piloto escalable de mantenimiento predictivo inteligente.
- Definición de indicadores de seguimiento y control inteligente, para evaluar disponibilidad, confiabilidad, calidad de información, integración SCADA – CMMS, alertas predictivas y costos relativos.
- Base técnica para lograr proponer un proyecto aplicado con datos reales en cualquier estación de bombeo, rebombeo y/o almacenamiento de hidrocarburos.

11. Conclusiones y recomendaciones

1. El mantenimiento predictivo inteligente actualmente es una alternativa viable para evolucionar desde las estrategias preventivas estáticas o correctivas no planeadas hacia una gestión de activos basada en condición, datos, riesgo y desempeño (Samatas et al., 2021; Zheng et al., 2020).
2. La Misión Académica Internacional en México aporta aprendizajes transferibles al sector industrial colombiano sobre IA, innovación y manejo de información; el valor del proyecto está en lograr adaptar los aprendizajes al contexto industrial colombiano, no en aplicarlos literalmente (Dimitrov Díaz, 2026; Mendoza, 2026).
3. El éxito de la implementación del modelo depende no tanto de la adquisición de nuevas tecnologías, sino de datos confiables, taxonomía de activos, SCADA, EAM/CMMS, sensores, ciberseguridad y decisiones basadas en datos (ISO, 2016; IEC, 2024; Ruiz Rodríguez et al., 2025).
4. La prioridad inicial debe ser el cierre de brechas de calidad de datos, integrar información de operación y mantenimiento, y paulatinamente eliminar la obsolescencia tecnológica en activos críticos para las estaciones (Alvarez Quiñones et al., 2022; Póvoas et al., 2025).

1996/2026
Memoria que trasciende

5. La recomendación es ejecutar inicialmente un piloto controlado en una estación elegida por su criticidad en el sistema, con la implementación de indicadores de disponibilidad, MTBF, MTTR, calidad de datos, alertas útiles, integración SCADA-EAM y costos evitados (ISO, 2024; Ruiz Rodríguez et al., 2025).

Referencias

- Alvarez Quiñones, L. I., Lozano Moncada, C. A., & Bravo Montenegro, D. A. (2022). Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático. *Ingeniería*, 27(3), e17742. <https://doi.org/10.14483/23448393.17742>
- Bhamare, D., Zolanvari, M., Erbad, A., Jain, R., Khan, K., & Meskin, N. (2020). Cybersecurity for industrial control systems: A survey. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2002.04124>
- Cummins, L., Sommers, A., Ramezani, S. B., Mittal, S., Jabour, J., Seale, M., & Rahimi, S. (2024). Explainable predictive maintenance: A survey of current methods, challenges and opportunities. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2401.07871>
- Dimitrov Díaz, C. (2026). Mantenimiento predictivo inteligente en estaciones de transporte de hidrocarburos en Colombia [Anteproyecto de opción de grado no publicado]. Universidad Santo Tomás.
- García, A., Echeverría, A., & Ovejero, J. F. (2023). DETECTA: Investigación de metodologías no intrusivas apoyadas en tecnologías habilitadoras 4.0 para abordar un mantenimiento predictivo y ciberseguro en pymes industriales. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2306.05799>
- Gawde, S., Patil, S., Kumar, S., Kamat, P., Kotecha, K., & Abraham, A. (2022). Multi-fault diagnosis of industrial rotating machines using data-driven approach: A review of two decades of research. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2206.14153>

1996/2026

Memoria que trasciende

- International Electrotechnical Commission. (2024). IEC 62443 series: Security for industrial automation and control systems. IEC. <https://www.iec.ch/cyber-security>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000:2014 Asset management - Overview, principles and terminology. ISO.
- International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO.
- International Organization for Standardization. (2024). ISO 55001:2024 Asset management - Asset management system - Requirements. ISO.
- Krupitzer, C., Wagenhals, T., Züfle, M., Lesch, V., Schäfer, D., Mozaffarin, A., Edinger, J., Becker, C., & Kounev, S. (2020). A survey on predictive maintenance for Industry 4.0. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2002.08224>
- Lazo, A. T. (2024). El enfoque predictivo de la inteligencia artificial como herramienta para el mantenimiento de maquinaria industrial: una mirada desde la Industria 4.0. Entre Ciencia e Ingeniería, 18(35), 7-8. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9761327>
- Li, J. X., Zhang, T., Zhu, Y., & Chen, Z. (2024). Artificial general intelligence (AGI) for the oil and gas industry: A review. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2406.00594>
- Meindl, B., & Mendonça, J. (2021). Mapping Industry 4.0 technologies: From cyber-physical systems to artificial intelligence. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2111.14168>
- Mendoza, L. D. (2026). Análisis y transferencia de prácticas internacionales en la integración de ensayos no destructivos, inteligencia artificial y gemelos digitales para el mantenimiento predictivo de activos industriales en Colombia. Universidad Santo Tomás. <http://hdl.handle.net/11634/72037>
- National Fire Protection Association. (2023). NFPA 70B: Standard for Electrical Equipment Maintenance. NFPA.

- Póvoas, M. dos S., Moreira, J. F., Neto, S. V. M., Carvalho, C. A. da S., Cezario, B. S., Guedes, A. L. A., & Lima, G. B. A. (2025). Artificial intelligence in the oil and gas industry: Applications, challenges, and future directions. *Applied Sciences*, 15(14), 7918.
<https://doi.org/10.3390/app15147918>
- Ruiz Rodríguez, N., Silva Jiménez, C., & Moreno García, N. (2025). Prototipo de gestión de KPI con alertas inteligentes para transporte de hidrocarburos (PGAI).
<https://hdl.handle.net/10882/14842>
- Samatas, G. G., Moumgiakmas, S. S., & Papakostas, G. A. (2021). Predictive maintenance - Bridging artificial intelligence and IoT. *IEEE World AI IoT Congress (AllIoT)*, 413-419.
<https://doi.org/10.1109/AllIoT52608.2021.9454173>
- Sánchez Salcedo, S. (2025). Implementación y estrategias de la analítica de datos en medianas y grandes empresas del sector de hidrocarburos. Universidad de La Salle.
<https://hdl.handle.net/20.500.14625/42753>
- Torres Martínez, J. V. (2024). Inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento. Universidad Industrial de Santander.
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42631>
- Zheng, H., Paiva, A. R., & Gurciullo, C. S. (2020). Advancing from predictive maintenance to intelligent maintenance with AI and IIoT. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2009.00351>
- Zhu, T., Ran, Y., Zhou, X., & Wen, Y. (2019). A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1912.07383>

Anexos

Anexo A.

Archivo Excel: Analisis_comparativo_mantenimiento_predictivo

1996/2026

Memoria que trasciende



TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico:

Calle 19 No. 11 - 64

Campus Avenida Universitaria:

Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Calle 48 No. 1 - 235 este.

Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202

Santoto Services:

Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106



**Aquí y
Ahora**



SANTOTOTUNJA.EDU.CO
NIT. 860.012.357-6



1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • **Campus Avenida Universitaria:**
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

