

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

Laura Daniela Mendoza Sanabria – laura.mendoza@usantoto.edu.co– Especialización en gerencia en mantenimiento y gestión de activos

Introducción

La gestión de activos industriales hoy no solo busca eficiencia; se enfrenta a un problema crítico: infraestructura envejecida, normativas cada vez más estrictas y una presión constante por la optimización de costos. En este panorama, el mantenimiento predictivo ha dejado de ser una opción para convertirse en el eje estratégico que permite anticipar fallas catastróficas y maximizar la vida útil de los activos críticos.

Si bien los Ensayos No Destructivos (END) son una variable muy importante para evaluar la integridad detectando corrosión, grietas o pérdida de espesor sin interrumpir la operación, su uso tradicional tiene una clara desventaja. Al limitarse a inspecciones puntuales con análisis, se pierde la oportunidad de actuar antes de que el daño sea irreversible. El dato se queda en el informe, no en la estrategia.

En Colombia, esta brecha tecnológica tiene un costo real. Datos de la ANDI y diversos informes sectoriales sugieren que, en los sectores minero energético e hidrocarburos, las paradas no programadas por fallas mecánicas invisibles golpean la productividad entre un 15% y un 25% (ANDI, 2019, p. 38) anual. No es solo lucro cesante; es logística de repuestos importados y mantenimiento correctivo de emergencia que inflan los presupuestos operativos por encima del 30% (ANH, 2022, p. 5)., alejando a las empresas de los estándares de sostenibilidad que dicta la norma ISO 55000.

La evolución lógica está en la convergencia. Al integrar la potencia analítica de la Inteligencia Artificial y la capacidad de simulación de los Gemelos Digitales, los END pasan a ser un insumo dinámico. Esta integración permite que la información de sensores e inspecciones técnicas alimente modelos virtuales que replican el comportamiento del activo físico en tiempo real. Es aquí donde reside la verdadera oportunidad estratégica: transformar el resultado de una inspección técnica en una decisión gerencial basada en datos predictivos de alto valor.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un modelo conceptual que integre Ensayos No Destructivos (END), Inteligencia Artificial y Gemelos Digitales, orientado a optimizar las estrategias de mantenimiento predictivo en el sector industrial colombiano.

Objetivos específicos

1. Definir las bases conceptuales de integración entre la inspección técnica y los gemelos digitales, a partir de referentes y experiencias internacionales.
2. Analizar, desde un enfoque teórico, el uso de modelos de Inteligencia Artificial para la interpretación de datos de integridad y la predicción de fallas en activos mecánicos.
3. Establecer los factores de viabilidad para la implementación de estas tecnologías en la industria nacional mediante un análisis de contexto referencial.

Metodología

Para el desarrollo de esta propuesta, se adoptó una metodología de carácter cualitativo con un enfoque descriptivo y analítico. El proceso no se limitó a una recopilación documental, sino que se estructuró como un análisis técnico de viabilidad dividido en tres etapas fundamentales:

En una primera fase, la identificación y selección de las prácticas internacionales se realizó bajo el marco de la misión académica internacional en Brasil. Los criterios de inclusión para estas metodologías no fueron aleatorios; se priorizaron aquellas tecnologías que demostraron una interoperabilidad probada entre sistemas de inspección física (END) y plataformas de gestión virtual (Gemelos Digitales) en sectores con altos estándares de seguridad operativa. Se tomaron como fuentes de información técnica los reportes de empresas líderes en la región y los lineamientos de transformación digital discutidos en escenarios académicos de alto nivel durante la estancia.

Posteriormente, se llevó a cabo el procedimiento de comparación conceptual entre los modelos de aprendizaje automático LSTM, Random Forest y XGBoost. Dado que el alcance de este trabajo es estratégico y gerencial, el análisis no se centró en métricas de error de entrenamiento, sino en una evaluación de idoneidad arquitectónica. Para esto, se contrastaron las capacidades de cada modelo frente a los retos típicos de la integridad mecánica, tales como la naturaleza no lineal de la fatiga de materiales y el manejo de datos de sensores con alta presencia de ruido ambiental, determinando así su pertinencia teórica para apoyar la toma de decisiones en tiempo real.

Finalmente, el diagnóstico de factibilidad para el entorno industrial colombiano se realizó mediante una hibridación metodológica. Se utilizó la matriz PESTEL como eje conductor, pero su ejecución se potenció mediante el uso de entornos de Inteligencia Artificial avanzada (Google AI Studio) desarrollados en el marco de la misión en Brasil. Este procedimiento permitió un procesamiento semántico profundo de la normativa nacional vigente (como los documentos CONPES de inteligencia artificial y transformación digital) y una identificación precisa de las brechas de infraestructura en el país. Este análisis de contexto funcionó como el filtro final para asegurar que la propuesta de integración técnica sea, además de innovadora, ejecutable bajo las condiciones económicas y legales de la industria nacional.

Desarrollo y análisis de resultados

Modelo Conceptual de Integración Tecnológica

La integración de Ensayos No Destructivos (END), Inteligencia Artificial (IA) y Gemelos Digitales se propone como una arquitectura de cuatro niveles funcionales. Este modelo permite que el dato técnico evolucione desde una simple captura de campo hasta una decisión estratégica gerencial.

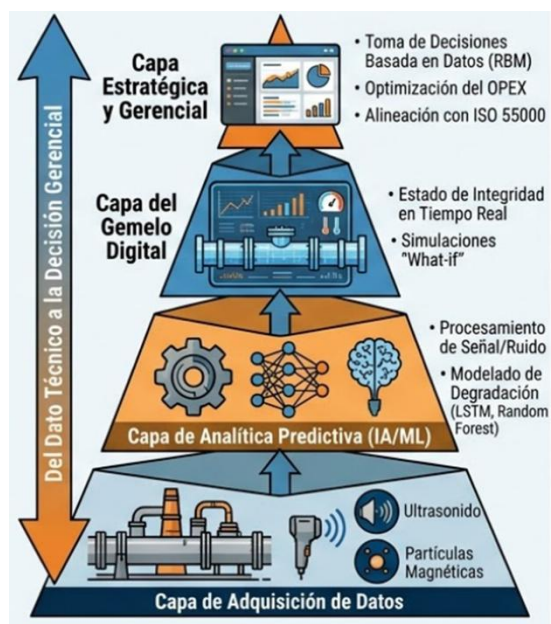


Figura 1. Arquitectura funcional del modelo predictivo 4.0

Como se ilustra en la Figura 1, la base del modelo es la Capa de Adquisición, donde técnicas de END registran el estado físico real del activo. Estos datos fluyen hacia la Capa de Analítica, donde algoritmos de IA procesan las tendencias de degradación. El resultado final se consolida en un Gemelo Digital, que actúa como la interfaz de usuario para el gestor de activos, permitiendo una supervisión en tiempo real bajo los estándares de la norma ISO 55000.

Sinergia Tecnológica y Flujo de Gestión

La sinergia entre estas tecnologías no es lineal, sino un ciclo continuo de retroalimentación que optimiza los recursos de mantenimiento.

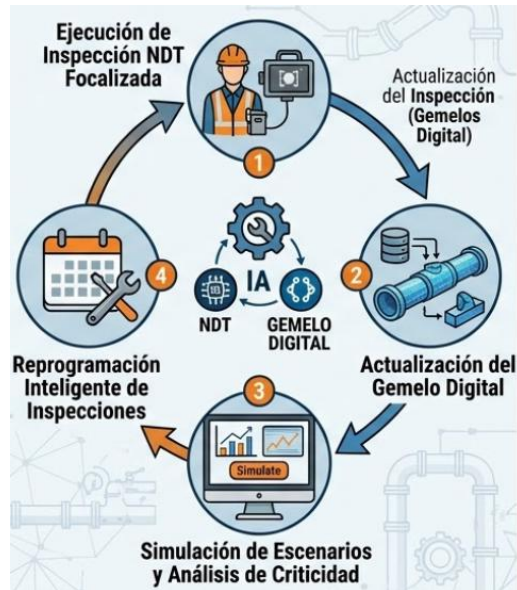


Figura 2. Ciclo de valor y retroalimentación del sistema

En la Figura 2 se observa que el Gemelo Digital, alimentado por las predicciones de la IA, permite realizar simulaciones de escenarios What-if. Estas simulaciones identifican zonas de mayor criticidad, lo que permite al departamento de mantenimiento reprogramar y focalizar los próximos END solo donde realmente se necesitan. En el contexto colombiano, esta focalización es clave para reducir el gasto operativo (OPEX) asociado a inspecciones innecesarias y logística de repuestos.

Análisis Comparativo de Modelos de Inteligencia Artificial

Para la selección de los algoritmos de IA, se realizó una comparación de idoneidad técnica basada en los requerimientos de la integridad mecánica.

Tabla 1. Comparativa de modelos predictivos según su aplicabilidad técnica

Criterio Técnico	LSTM (Redes Neuronales)	Random Forest (Árboles de Decisión)
Memoria de Datos	Alta: Recuerda el historial de años para predecir el futuro.	Baja: Analiza el dato actual como una foto fija.
Estabilidad en Campo	Sensible: Se puede confundir con datos erróneos (ruido).	Alta: Muy estable frente a mediciones con interferencia.
Claridad de Decisión	Caja Negra: El proceso es complejo de explicar.	Transparente: Es fácil ver qué variable causó el riesgo.

La Tabla 1 determina que, para la predicción de fenómenos de degradación como la corrosión, el modelo LSTM es el más adecuado debido a su memoria de largo plazo. Sin embargo, para el diagnóstico y clasificación de tipos de fallas en entornos industriales ruidosos, el modelo Random Forest ofrece una estabilidad superior y una mayor facilidad de interpretación para los niveles de decisión gerencial.

Análisis PESTEL: Adopción Tecnológica en el Contexto Colombiano

El análisis del entorno evidencia que Colombia se encuentra en un punto de inflexión para la integración de END–IA–Gemelos Digitales. A continuación, se detallan los factores clave:

- **Político y Normativo:** Existen marcos de transformación digital y políticas de innovación (como las del MinTIC) que incentivan la industria 4.0. No obstante, el reto principal radica en la creación de estándares técnicos específicos que regulen la validez de los modelos predictivos en auditorías de integridad.
- **Económico:** La madurez de la industria extractiva y energética en Colombia exige optimizar el ciclo de vida de activos críticos. Aunque la inversión inicial es un desafío, el retorno se justifica mediante la reducción del OPEX y la mitigación de paradas no programadas, factores vitales ante la volatilidad de los precios del sector.
- **Social:** Se identifica una brecha de talento humano especializado en la intersección de la metalurgia y la ciencia de datos. La adopción exitosa depende de una gestión del cambio que mitigue la resistencia al reemplazo de métodos tradicionales por herramientas digitales.
- **Tecnológico:** El país cuenta con una infraestructura de conectividad en crecimiento y un ecosistema de analítica de datos en expansión. La clave está en la interoperabilidad entre los sistemas actuales y las nuevas arquitecturas de Gemelos Digitales.
- **Ambiental y Legal:** La presión regulatoria (ANLA /Agencia Nacional de Hidrocarburos) por una operación segura y limpia hace que estas tecnologías sean esenciales. Anticipar fallas no solo protege el activo, sino que garantiza la licencia social para operar al reducir el riesgo de incidentes ambientales.

5. Conclusiones

1. La integración conceptual de Ensayos No Destructivos, Inteligencia Artificial y Gemelos Digitales constituye un enfoque estratégico para fortalecer el mantenimiento predictivo y la gestión de activos industriales.
2. Los modelos de Inteligencia Artificial analizados permiten, desde un enfoque conceptual, transformar los datos de inspección en información útil para la toma de decisiones técnicas y gerenciales.
3. El gemelo digital actúa como un elemento integrador que facilita la visualización, análisis y comprensión del comportamiento de los activos a lo largo de su ciclo de vida.
4. La transferencia de estas prácticas al contexto colombiano es viable a nivel conceptual, siempre que se aborde de manera progresiva y alineada con la madurez digital de las organizaciones.

5. El enfoque propuesto aporta valor estratégico a la gestión de activos al fortalecer la confiabilidad, la seguridad operacional y la sostenibilidad, sin requerir desarrollos tecnológicos ni validaciones experimentales en esta etapa académica.
6. Sostenibilidad y Cumplimiento Normativo: La adopción de estas tecnologías fortalece la seguridad operativa, minimizando el riesgo de fallas catastróficas. Esto no solo facilita el cumplimiento de normativas ante entes como la ANLA, sino que protege la licencia social para operar al prevenir incidentes ambientales en sectores de alto impacto.

REFERENCIAS

1. ANH. (2022). *Lineamientos técnicos para la integridad de activos en la industria de hidrocarburos*. Agencia Nacional de Hidrocarburos. <https://www.anh.gov.co>
2. API. (2016). *API RP 580: Risk-based inspection* (3rd ed.). American Petroleum Institute. <https://www.api.org>
3. ISO. (2014). *ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/55088.html>
4. Kapoor, A., Gupta, A., & Sharma, M. (2022). Digital Twin and Artificial Intelligence in Maintenance Management: A Review of Industry 4.0 Applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.010>
5. Martinez, J., & Gomez, L. (2023). Digitalización de la industria de Hidrocarburos en Colombia: Retos y oportunidades en la adopción de Gemelos Digitales. *Revista Técnica de Ingeniería*, 46(2), 45-58.
6. Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>
7. Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Chrysosolouris, G. (2023). Advanced predictive maintenance strategies using digital twins and machine learning: A roadmap for Industry 4.0. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(4), 512-528. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2140356>
8. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia [ANDI]. (2019). Informe de la Encuesta de Transformación Digital 2019. Vicepresidencia de Transformación Digital. Página 38.
9. Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH]. (2022). *Acuerdo Número 002 de 2022: Por el cual se establecen los lineamientos técnicos para la gestión de la integridad de activos*. Ministerio de Minas y Energía. Página 5.