

APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO EN SISTEMAS EÓLICOS RURALES INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA EN EL PROYECTO VIENTOS DE ESPERANZA DEL SENA – REGIONAL LA GUAJIRA



SENNOVA

Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación

ISSN 2619 - 2896

01

APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO EN SISTEMAS EÓLICOS RURALES INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA EN EL PROYECTO VIENTOS DE ESPERANZA DEL SENA – REGIONAL LA GUAJIRA

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE OPTIMIZATION OF MAINTENANCE STRATEGIES IN RURAL WIND SYSTEMS: TECHNOLOGICAL INTEGRATION IN THE VIENTOS DE ESPERANZA PROJECT OF SENA – LA GUAJIRA REGION

Adalberto López Gómez, Fainer Yesid Cerpa Olivera, Adriana Marcela Melo Camargo

Ingeniero Mecatrónico; Esp. en Gerencia del Mantenimiento; Facilitador Tecnoacademia Email: adlopezg@sena.edu.co

Magister en Ingeniería Mecánica, Ingeniero Mecánico, Facilitador Tecnoacademia Email: fycerpa@sena.edu.co

Ingeniera Electronica; Esp. Energía Renovable y Técnico en Mantenimiento e Instalación de Sistemas Fotovoltaicos

Email: amarce2002@hotmail.com

RESUMEN

El acceso sostenible al agua en zonas rurales de La Guajira depende en gran medida del funcionamiento continuo de sistemas eólicos destinados a la extracción de agua subterránea. Sin embargo, la falta de estrategias de mantenimiento estructuradas ha limitado la confiabilidad y disponibilidad de estos sistemas. El presente artículo analiza la aplicación de técnicas de inteligencia artificial como herramienta para optimizar las estrategias de mantenimiento en sistemas eólicos rurales, en el marco del proyecto Vientos de Esperanza del SENA Regional La Guajira. La investigación adopta un enfoque descriptivo-analítico, apoyado en una revisión bibliográfica sistemática sobre mantenimiento predictivo, confiabilidad y modelos de inteligencia artificial aplicados a sistemas eólicos. Los resultados evidencian que la integración de algoritmos de IA permite fortalecer la toma de decisiones en mantenimiento, mejorar la detección temprana de fallas y optimizar la gestión de activos en contextos rurales. Se concluye que la aplicación de inteligencia artificial constituye una alternativa viable para incrementar la sostenibilidad operativa de los sistemas eólicos rurales y fortalecer el impacto social del proyecto.

Palabras claves: inteligencia artificial, mantenimiento predictivo, sistemas eólicos rurales, gestión de activos, SENA.

ABSTRACT

Sustainable access to water in rural areas of La Guajira largely depends on the continuous operation of wind systems used for groundwater extraction. However, the lack of structured maintenance strategies has limited the reliability and availability of these systems. This article analyzes the application of artificial intelligence techniques as a tool to optimize maintenance strategies in rural wind systems within the framework of the Vientos de Esperanza project of SENA – La Guajira Region. A descriptive-analytical approach was adopted, supported by a systematic literature review on predictive maintenance, reliability, and AI-based models applied to wind systems. The findings indicate that AI integration enhances maintenance decision-making, improves early fault detection, and optimizes asset management in rural contexts. It is concluded that artificial intelligence represents a viable alternative to increase the operational sustainability of rural wind systems and strengthen the social impact of the project.

Keywords: artificial intelligence, predictive maintenance, rural wind systems, asset management, SENA.

INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovable ha posicionado a la energía eólica como una alternativa estratégica para el desarrollo sostenible, especialmente en territorios con condiciones climáticas favorables. En La Guajira, región caracterizada por vientos constantes y limitaciones en el acceso al agua potable, los sistemas eólicos rurales cumplen un papel fundamental en la extracción de agua para comunidades dispersas y de difícil acceso.

El proyecto Vientos de Esperanza del SENA Regional La Guajira surge como una iniciativa orientada a mejorar las condiciones de vida de comunidades rurales mediante la implementación de molinos de viento para el abastecimiento hídrico. No obstante, la sostenibilidad de estos sistemas se ha visto afectada por fallas recurrentes, tiempos prolongados de inactividad y ausencia de planes de mantenimiento basados en criterios técnicos y de confiabilidad.

Tradicionalmente, el mantenimiento de los sistemas eólicos rurales se ha desarrollado bajo enfoques correctivos o preventivos básicos, los cuales resultan insuficientes para anticipar fallas críticas y optimizar el ciclo de vida de los activos. En este contexto, la inteligencia artificial emerge como una herramienta clave para el fortalecimiento de estrategias de mantenimiento, al permitir el análisis de datos operativos, la detección de patrones de falla y la toma de decisiones basada en modelos predictivos (Jardine et al., 2006).

Diversos estudios han evidenciado que la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, redes neuronales y árboles de decisión en sistemas eólicos mejora la confiabilidad, reduce costos de mantenimiento y aumenta la disponibilidad operativa (Lei et al., 2018). Sin embargo, la mayoría de

estas aplicaciones se han desarrollado en parques eólicos industriales, existiendo una brecha significativa en su adaptación a contextos rurales.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo analizar la aplicación de inteligencia artificial para la optimización de estrategias de mantenimiento en sistemas eólicos rurales, integrando herramientas tecnológicas al proyecto Vientos de Esperanza del SENA Regional La Guajira. El estudio busca aportar elementos conceptuales y metodológicos que permitan fortalecer la gestión de activos, mejorar la sostenibilidad operativa de los sistemas y maximizar su impacto social en comunidades rurales.

DESARROLLO

Sistemas eólicos rurales y desafíos del mantenimiento

Los sistemas eólicos rurales destinados a la extracción de agua presentan condiciones operativas significativamente diferentes a las de los aerogeneradores industriales conectados a red. Estos sistemas suelen operar de manera autónoma, en entornos con limitada infraestructura técnica, acceso restringido a repuestos y condiciones ambientales adversas como altas temperaturas, polvo y humedad. Estas variables incrementan el desgaste mecánico de componentes críticos como el rotor, el sistema de transmisión, los rodamientos y los mecanismos de bombeo, afectando la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

En el contexto del proyecto Vientos de Esperanza, el mantenimiento ha dependido tradicionalmente de intervenciones correctivas o preventivas de carácter periódico, las cuales, si bien permiten restablecer la operación, no garantizan la detección temprana de fallas incipientes. Esta situación genera tiempos prolongados de inactividad, incremento de costos logísticos y afectación directa al suministro de agua en comunidades rurales, donde estos sistemas representan

una infraestructura crítica.

La ausencia de planes de mantenimiento basados en confiabilidad y análisis de datos limita la capacidad de priorizar activos, identificar modos de falla recurrentes y optimizar el ciclo de vida de los sistemas eólicos rurales. En este sentido, la incorporación de enfoques más avanzados se convierte en una necesidad técnica y social.

Inteligencia artificial como soporte a las estrategias de mantenimiento

La inteligencia artificial aplicada al mantenimiento ofrece herramientas para transformar datos operativos en información útil para la toma de decisiones. En sistemas eólicos, variables como velocidad del viento, vibraciones, temperatura, número de ciclos operativos y tiempos de parada pueden ser analizadas mediante algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones anómalos asociados al deterioro de componentes.

Modelos como redes neuronales artificiales, árboles de decisión y algoritmos de clasificación permiten establecer relaciones no lineales entre las variables operativas y los estados de salud del sistema. Estos enfoques superan las limitaciones de los métodos tradicionales basados únicamente en inspecciones visuales o calendarios de mantenimiento fijo, permitiendo anticipar fallas antes de que estas se manifiesten de forma crítica (Jardine et al., 2006).

En el ámbito del mantenimiento predictivo, la inteligencia artificial facilita la transición desde estrategias reactivas hacia esquemas basados en condición, en los cuales las intervenciones se realizan en función del estado real del activo. Esto resulta especialmente relevante en entornos rurales, donde cada intervención implica costos elevados de desplazamiento y recursos técnicos limitados.

Integración tecnológica de la IA en contextos rurales

La implementación de inteligencia artificial en sistemas eólicos rurales requiere

una adaptación tecnológica acorde con las condiciones del entorno. A diferencia de los parques eólicos industriales, donde existe disponibilidad de sistemas SCADA y grandes volúmenes de datos, los sistemas rurales demandan soluciones simplificadas, robustas y de bajo costo.

La integración tecnológica en el proyecto Vientos de Esperanza puede apoyarse en el uso de sensores básicos para la medición de variables críticas, combinados con dispositivos de procesamiento local que permitan ejecutar modelos de IA de manera autónoma. Esta arquitectura descentralizada reduce la dependencia de conectividad permanente y facilita la operación en zonas remotas.

Adicionalmente, la apropiación tecnológica por parte de las comunidades y del personal técnico local constituye un factor clave para la sostenibilidad del sistema. La formación en conceptos básicos de mantenimiento, monitoreo y análisis de datos permite fortalecer la capacidad local de respuesta ante fallas y garantiza la continuidad operativa de los sistemas eólicos rurales.

Alineación con la gestión de activos y el impacto social

Desde un enfoque de gestión de activos, la aplicación de inteligencia artificial en el mantenimiento de sistemas eólicos rurales contribuye a la toma de decisiones estratégicas basadas en riesgo y criticidad. La identificación de componentes críticos, la priorización de intervenciones y la planificación de recursos se ven fortalecidas mediante el uso de modelos predictivos, alineándose con los principios del mantenimiento centrado en confiabilidad (Moubray, 1997).

Más allá de los beneficios técnicos, la optimización del mantenimiento mediante IA tiene un impacto social directo en las comunidades beneficiarias del proyecto Vientos de Esperanza. La mejora en la disponibilidad de los sistemas eólicos garantiza un acceso más continuo al agua, fortaleciendo la seguridad hídrica y contribuyendo al bienestar y

desarrollo rural en La Guajira. La economía circular es un modelo económico que busca maximizar el aprovechamiento de los recursos minimizando la generación de residuos y fomentando su reutilización. En contraste con el modelo lineal de "producir, consumir y desechar", la economía circular promueve el diseño de productos que puedan ser reciclados o reutilizados al final de su vida útil. Este enfoque es especialmente relevante en la gestión de residuos plásticos, donde se busca transformar los desechos en productos de valor agregado, como mobiliario, ladrillos plásticos y elementos agropecuarios (WWF, 2024).

En Colombia, la adopción de la economía circular se ha incentivado mediante la Ley 2232 de 2022 y la Resolución 0803 de 2024, las cuales buscan la eliminación progresiva de los plásticos de un solo uso y fomentan la creación de materiales reutilizables (MinAmbiente, 2024a). Este marco normativo destaca la participación de recicladores de oficio como actores fundamentales en la cadena de reciclaje, promoviendo su integración en la economía formal (MinAmbiente, 2024b).

Normativa y Políticas Ambientales

El marco normativo colombiano, encabezado por la Ley 2232 de 2022, busca reducir gradualmente el uso de plásticos de un solo uso mediante regulaciones específicas que fomentan la creación de productos reciclados y la reutilización de materiales (MinAmbiente, 2024a). La normativa destaca también la importancia de la responsabilidad extendida del productor, que obliga a las empresas a gestionar los residuos generados por sus productos y promover soluciones sostenibles (MinAmbiente, 2024b).

Estas políticas son esenciales para respaldar iniciativas en la ciudad de Riohacha, donde la economía circular no solo reduce la contaminación, sino que también genera empleo y fortalece la infraestructura local de reciclaje.

DESARROLLO

Enfoque metodológico

La investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo-analítico, orientado a analizar el potencial de la inteligencia artificial en la optimización de estrategias de mantenimiento aplicadas a sistemas eólicos rurales. Este enfoque permitió estudiar el fenómeno desde una perspectiva técnica y conceptual, integrando fundamentos de mantenimiento industrial, confiabilidad y gestión de activos, sin recurrir a la experimentación directa sobre los sistemas del proyecto Vientos de Esperanza.

El estudio se centra en el análisis de metodologías, modelos y experiencias documentadas en la literatura científica, con énfasis en su aplicabilidad a contextos rurales caracterizados por limitaciones de infraestructura, conectividad y recursos técnicos.

Fase de revisión y revisión bibliográfica

Como fase inicial del proceso metodológico, se realizó una revisión bibliográfica sistemática con el objetivo de identificar, analizar y sintetizar investigaciones relacionadas con inteligencia artificial aplicada al mantenimiento, mantenimiento predictivo, confiabilidad de sistemas eólicos y gestión de activos.

La búsqueda se efectuó en bases de datos académicas y repositorios especializados, priorizando artículos científicos, libros técnicos y documentos institucionales publicados por organismos reconocidos. Se emplearon palabras clave como inteligencia artificial, mantenimiento predictivo, sistemas eólicos, confiabilidad, gestión de activos y mantenimiento basado en condición. Los criterios de selección incluyeron pertinencia temática, rigor metodológico y relevancia para sistemas energéticos, con especial atención a estudios aplicables a entornos rurales.

Análisis conceptual y categorización

A partir de la revisión bibliográfica, se realizó un análisis conceptual orientado a establecer las principales categorías de estudio. Estas categorías incluyeron: estrategias de mantenimiento, técnicas de inteligencia artificial, variables operativas de sistemas eólicos y criterios de gestión de activos. La categorización permitió estructurar el análisis y relacionar los enfoques de mantenimiento con las herramientas de IA más adecuadas para sistemas eólicos rurales. Este proceso facilitó la identificación de ventajas, limitaciones y requerimientos técnicos asociados a la implementación de inteligencia artificial en contextos con restricciones operativas, como los abordados en el proyecto Vientos de Esperanza.

Análisis de aplicabilidad al proyecto Vientos de Esperanza

Como parte del método, se llevó a cabo un análisis de aplicabilidad tecnológica, orientado a evaluar la pertinencia de los enfoques identificados en la literatura frente a las condiciones reales del proyecto Vientos de Esperanza. Este análisis consideró aspectos como la disponibilidad de datos, la criticidad de los componentes, la facilidad de implementación de sensores y la capacidad de operación y mantenimiento local. El objetivo de esta fase fue identificar estrategias de inteligencia artificial que pudieran ser adaptadas de manera progresiva y sostenible, sin requerir infraestructuras complejas ni altos costos de implementación, priorizando soluciones robustas y escalables.

Síntesis metodológica

Finalmente, se realizó una síntesis metodológica que integró los hallazgos de la revisión bibliográfica y del análisis conceptual, permitiendo construir un marco de referencia para la optimización de estrategias de mantenimiento mediante inteligencia artificial

en sistemas eólicos rurales. Esta síntesis constituye la base para la discusión de resultados y para la formulación de conclusiones orientadas a la mejora de la confiabilidad y sostenibilidad operativa de los sistemas del proyecto Vientos de Esperanza.

RESULTADOS

Resultados sobre estrategias de mantenimiento optimizadas con IA

La revisión evidencia que la transición desde enfoques correctivos y preventivos tradicionales hacia esquemas predictivos apoyados en inteligencia artificial permite mejorar la confiabilidad operativa y reducir la ocurrencia de fallas inesperadas en sistemas eólicos. En contextos rurales, esta optimización se traduce en una mejor planificación de intervenciones y una reducción de tiempos de inactividad críticos.

Tabla 1.
Comparación de estrategias de mantenimiento en sistemas eólicos rurales.

Estrategia de mantenimiento	Características principales	Limitaciones en contextos rurales	Aporte de la IA
Correctivo	Intervención posterior a la falla	Altos tiempos de inactividad y costos logísticos	No anticipa fallas
Preventivo	Intervenciones programadas por tiempo	No considera el estado real del sistema	Optimiza la programación
Predictivo (PdM)	Basado en condición y análisis de datos	Requiere análisis técnico	Anticipa fallas y reduce paradas
Basado en IA	Uso de modelos inteligentes para decisión	Requiere adaptación tecnológica	Mejora confiabilidad y disponibilidad

Resultados sobre técnicas de inteligencia artificial aplicables

El análisis bibliográfico permitió identificar las técnicas de inteligencia artificial con mayor potencial de aplicación en sistemas eólicos rurales, considerando variables como simplicidad, robustez y capacidad de operar con volúmenes limitados de datos.

Tabla 2.
Técnicas de inteligencia artificial aplicables al mantenimiento de sistemas eólicos rurales.

Técnica de IA	Aplicación en mantenimiento	Ventajas en entornos rurales
Árboles de decisión	Clasificación de estados de falla	Fácil interpretación
Redes neuronales artificiales	Predicción de fallas mecánicas	Alta capacidad de aprendizaje
Máquinas de soporte vectorial	Detección de anomalías	Buen desempeño con pocos datos
Algoritmos de regresión	Tendencias de degradación	Bajo costo computacional

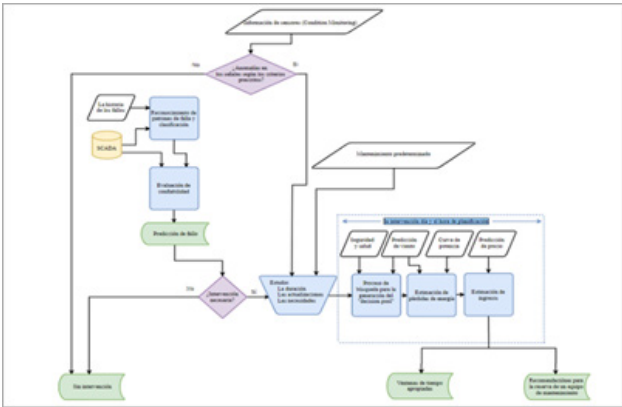
Resultados sobre beneficios operativos esperados

Los estudios revisados coinciden en que la aplicación de inteligencia artificial en estrategias de mantenimiento permite mejorar indicadores clave de desempeño en sistemas eólicos. En el contexto del proyecto Vientos de Esperanza, estos beneficios se asocian directamente con la continuidad del servicio de extracción de agua y la sostenibilidad social del sistema.

Tabla 3.
Beneficios operativos de la aplicación de IA en el mantenimiento de sistemas eólicos rurales.

Dimensión	Beneficio identificado	Impacto esperado
Confiabilidad	Detección temprana de fallas	Menor probabilidad de paradas
Disponibilidad	Reducción de tiempos muertos	Mayor continuidad del servicio
Costos	Optimización de recursos	Menor gasto en correctivos
Gestión de activos	Priorización de componentes críticos	Mejora en toma de decisiones
Impacto social	Continuidad en el suministro de agua	Beneficio directo a comunidades

Ilustración 1.
Modelo conceptual de la aplicación de inteligencia artificial para la optimización de estrategias de mantenimiento en sistemas eólicos rurales.



CONCLUSIÓN

El análisis realizado permite concluir que la aplicación de inteligencia artificial representa una alternativa técnicamente viable para la optimización de las estrategias de mantenimiento en sistemas eólicos rurales, como los implementados en el proyecto Vientos de Esperanza del SENA Regional La Guajira. La revisión bibliográfica evidencia que el uso de técnicas de mantenimiento predictivo apoyadas en IA fortalece la detección

temprana de fallas, mejora la confiabilidad operativa y optimiza la gestión de activos en entornos con limitaciones de infraestructura.

Asimismo, se identifica que la adaptación de estas tecnologías a contextos rurales es posible mediante el empleo de sensores básicos, modelos simplificados de inteligencia artificial y esquemas de análisis de datos ajustados a la disponibilidad operativa. Este enfoque permite reducir los tiempos de inactividad y optimizar los recursos destinados al mantenimiento, contribuyendo a la sostenibilidad técnica de los sistemas eólicos y a la continuidad del servicio de extracción de agua para las comunidades beneficiarias.

Finalmente, se concluye que la integración progresiva de inteligencia artificial en las estrategias de mantenimiento del proyecto Vientos de Esperanza fortalece el enfoque de gestión de activos y el mantenimiento centrado en confiabilidad, alineándose con los objetivos institucionales del SENA. Se recomienda que futuros estudios avancen hacia la validación empírica de estos enfoques mediante el análisis de datos operativos reales, con el fin de cuantificar su impacto y facilitar su replicabilidad en otros contextos rurales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., & Lin, J. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 799–834. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.016>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
- ISO. (2014). ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology. International Organization for Standardization.
- ISO. (2016). ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements. International Organization for Standardization.
- Gebraeel, N. Z., Elwany, A., Pan, J., & Biller, S. (2009). Residual life predictions in the absence of prior degradation knowledge. *IEEE Transactions on Reliability*, 58(1), 106–117. <https://doi.org/10.1109/TR.2008.2010429>
- Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Datadriven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 2213–2227. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2905565>
- Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrouche, M., Slaoui-Hasnaoui, F., Tameghe, T. A., & Ekemb, G. (2014). Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. *Energies*, 7(4), 2595–2630. <https://doi.org/10.3390/en7042595>
- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (2022). Lineamientos técnicos para la gestión de activos y mantenimiento en proyectos de energías renovables. SENA. <https://www.sena.edu.co>
- Ministerio de Minas y Energía. (2020). Plan energético nacional 2020–2050. Gobierno de Colombia. <https://www.minenergia.gov.co>