

Jornadas de Automática

Diseño de robot trepador magnético para turbinas eólicas

Fernández, G.^{a,*}, Sierra, J.E.^a, Peñacoba, M.^a

^a Departamento de Digitalización, Universidad de Burgos, Campus Río Vena, Avda. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España.

To cite this article: Fernández, G., Sierra, J.E., Peñacoba, M. 2026. Magnetic Climbing Robot Design for Wind Turbines. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13691>

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un robot trepador magnético orientado a la inspección de torres de turbinas eólicas, con especial interés en futuras aplicaciones marinas/offshore. El sistema desarrollado combina adherencia magnética híbrida y locomoción motorizada para desplazarse sobre superficies ferromagnéticas verticales de forma segura y eficiente. El artículo describe el diseño mecánico del robot, el sistema de locomoción y la distribución de componentes y la arquitectura electrónica de control y potencia implementada. La solución propuesta emplea imanes permanentes junto con electroimanes de activación selectiva para mejorar la estabilidad durante el desplazamiento vertical. Además, se presenta una validación preliminar basada en análisis teóricos y simulaciones sobre superficies metálicas. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad del sistema como plataforma robótica para aplicaciones de inspección y mantenimiento predictivo en el sector eólico.

Palabras clave: Robot trepador, Robot Móvil, Turbinas eólicas, Adhesión magnética, Diseño electromecánico.

Magnetic Climbing Robot Design for Wind Turbines

Abstract

This work presents the design of a magnetic climbing robot intended for the inspection of wind turbine towers, with particular interest in future offshore applications. The developed system combines hybrid magnetic adhesion and motorized locomotion to move safely and efficiently across vertical ferromagnetic surfaces. The paper describes the mechanical design of the robot, locomotion system, and component distribution, as well as the implemented electronic control and power architecture. The proposed solution employs permanent magnets together with selectively activated electromagnets to improve stability during vertical displacement. Furthermore, a preliminary validation based on theoretical analysis and simulations on metallic surfaces is presented. The obtained results demonstrate the feasibility of the proposed system as a robotic platform for inspection and predictive maintenance applications in the wind energy sector.

Keywords: Climbing robot, Mobile robot, Wind turbines, Magnetic adhesion, Electromechanical design.

1. Introducción

El crecimiento del sector de la energía eólica ha incrementado la necesidad de desarrollar sistemas capaces de realizar tareas de inspección y mantenimiento de forma segura, eficiente y automatizada (Memari et al., 2024). Las torres de turbinas eólicas requieren inspecciones periódicas para detectar defectos estructurales, corrosión, deterioro superficial o posibles fallos mecánicos asociados a la operación continua y a la exposición ambiental. Actualmente, gran parte de estas tareas siguen realizándose mediante inspecciones manuales, implicando elevados costes operativos y riesgos para el personal técnico debido al trabajo en altura.

En este contexto, los robots trepadores representan una solución de gran interés para aplicaciones de inspección sobre superficies verticales metálicas (Fang et al., 2022). Estos sistemas permiten automatizar procesos de mantenimiento

predictivo y reducir la exposición humana a entornos peligrosos, mejorando además la repetibilidad y frecuencia de las inspecciones. Sin embargo, el diseño de este tipo de robots presenta importantes desafíos relacionados con la adherencia, la estabilidad dinámica, el consumo energético y la capacidad de desplazamiento sobre geometrías verticales o curvadas.

Diversas tecnologías de adhesión han sido empleadas en robots trepadores, incluyendo sistemas magnéticos, ventosas de vacío y mecanismos basados en presión negativa activa (Lee et al., 2018).

Entre ellas, la adhesión magnética destaca especialmente en aplicaciones industriales sobre superficies ferromagnéticas debido a su elevada fiabilidad, simplicidad mecánica y reducido consumo energético, especialmente cuando se emplean imanes permanentes. Asimismo, la integración de electroimanes permite implementar estrategias de control activo para mejorar la estabilidad y la maniobrabilidad del sistema durante el desplazamiento (Fernández et al., 2026).

En los últimos años se han desarrollado numerosos robots destinados a inspección industrial y mantenimiento de infraestructuras verticales, incluyendo aplicaciones en turbinas eólicas, estructuras metálicas y entornos industriales automatizados (Sahbel et al., 2019), (Franko et al., 2020). No obstante, muchos de estos sistemas presentan limitaciones relacionadas con la complejidad mecánica, la autonomía energética o la capacidad de adaptación a distintas condiciones de operación.

En este contexto, el presente trabajo propone el diseño de un robot trepador magnético de bajo coste orientado a la inspección de turbinas eólicas, planteado como una plataforma modular adaptable a futuras aplicaciones en entornos marinos/offshore. El sistema incorpora una arquitectura mecánica y electrónica simplificada, diseñada bajo criterios de simplicidad constructiva, facilidad de fabricación y posibilidad de integración futura de sensores y sistemas avanzados de inspección. Asimismo, el robot emplea un sistema híbrido de adherencia basado en imanes permanentes y electroimanes de activación selectiva (Chen et al., 2020), con el objetivo de mejorar la estabilidad y la seguridad durante el desplazamiento sobre superficies metálicas verticales. Finalmente, se realiza una validación preliminar mediante análisis teóricos y simulaciones para evaluar la viabilidad del sistema en aplicaciones de inspección industrial.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 describe el diseño mecánico y el sistema de adherencia del robot. La Sección 3 presenta la arquitectura electrónica y de control implementada. La Sección 4 recoge la validación preliminar y el análisis del diseño desarrollado. Finalmente, la Sección 5 expone las conclusiones y las posibles líneas futuras de investigación.

2. Diseño del robot trepador

2.1. Arquitectura general del sistema

La solución desarrollada consiste en un robot trepador móvil diseñado para desplazarse sobre superficies metálicas verticales mediante un sistema combinado de locomoción motorizada y adherencia magnética híbrida. El objetivo principal del diseño es garantizar un desplazamiento estable y seguro sobre torres metálicas de turbinas eólicas, manteniendo al mismo tiempo una arquitectura compacta, modular y de bajo coste.

El sistema ha sido concebido como una plataforma de cuatro ruedas motrices integradas sobre un chasis estructural. Durante el proceso de diseño se priorizaron criterios de simplicidad constructiva, facilidad de fabricación y posibilidad de integración futura de sensores y sistemas avanzados de inspección.

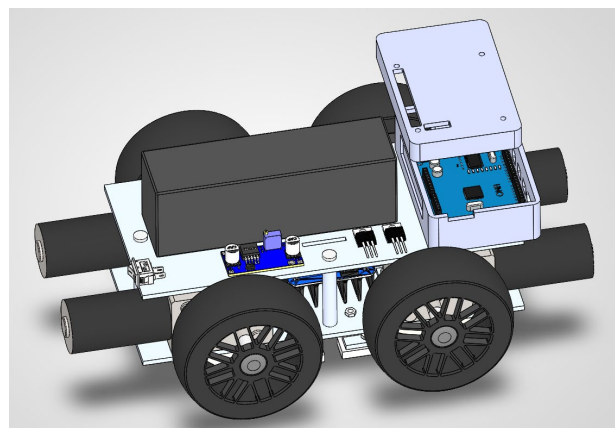


Figura 1: Diseño CAD general del robot trepador magnético.

La locomoción del robot se realiza mediante motores de corriente continua con reductora, seleccionados por su capacidad para proporcionar un elevado par a bajas velocidades, característica especialmente importante en aplicaciones de desplazamiento vertical (Pfaffel et al., 2017). Esta configuración permite vencer tanto el peso propio del sistema como las fuerzas de rozamiento asociadas a la adherencia magnética sobre la superficie metálica.

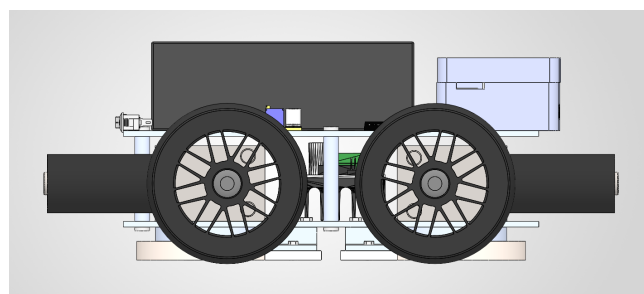


Figura 2: Vista estructural y distribución de componentes del robot.

La arquitectura electrónica del sistema se compone de un microcontrolador Arduino encargado de la gestión del sistema de control y la coordinación de los distintos actuadores del robot. El accionamiento de los motores se realiza mediante drivers de potencia, mientras que el sistema híbrido de adherencia combina electroimanes de activación selectiva e imanes permanentes para garantizar la estabilidad durante el desplazamiento. El sistema se alimenta mediante una batería recargable integrada en el chasis, diseñada para proporcionar autonomía al conjunto y permitir el funcionamiento simultáneo de motores, electrónica de control y sistema magnético. Asimismo, la arquitectura propuesta contempla la posibilidad de integrar futuros sensores de inspección, sistemas de adquisición de datos y módulos de comunicación inalámbrica.

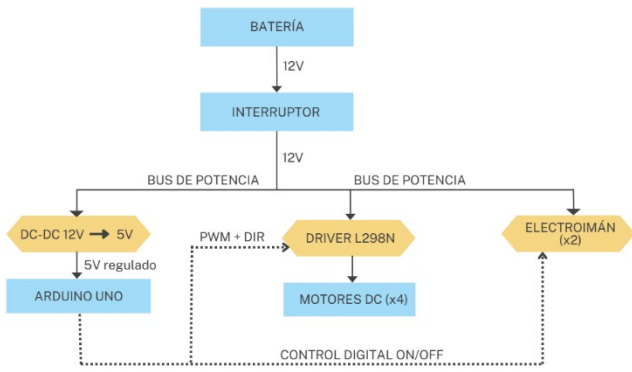


Figura 3. Diagrama general de la arquitectura electrónica.

2.2. Sistema de adherencia magnética

El sistema de adherencia constituye uno de los elementos fundamentales del robot desarrollado. La solución adoptada combina imanes permanentes con electroimanes de activación selectiva, permitiendo aprovechar las ventajas de ambos sistemas y mejorar el equilibrio entre estabilidad, consumo energético y seguridad operativa.

Los imanes permanentes proporcionan una fuerza de adherencia constante sobre la superficie ferromagnética, reduciendo considerablemente el consumo energético del sistema durante el funcionamiento normal. Por otro lado, los electroimanes permiten incrementar la fuerza de fijación en situaciones concretas, como maniobras, paradas o condiciones de operación críticas. Esta arquitectura híbrida permite mantener un nivel mínimo de adherencia incluso ante posibles fallos de alimentación eléctrica.

La fuerza de adherencia magnética puede aproximarse mediante la siguiente expresión siguiendo modelos empleados en robots trepadores magnéticos (Lee et al., 2018):

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2 \cdot \mu_0} \quad (1)$$

donde B representa la densidad de flujo magnético, A el área efectiva de contacto y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío.

Asimismo, para garantizar el desplazamiento vertical del robot debe cumplirse la condición de equilibrio entre el peso y la fuerza de fricción generada sobre la superficie:

$$\mu \cdot F_{adh} \geq m \cdot g \quad (2)$$

donde μ representa el coeficiente de fricción entre las ruedas y la superficie metálica, F_{adh} la fuerza de adherencia total y mg el peso del robot.

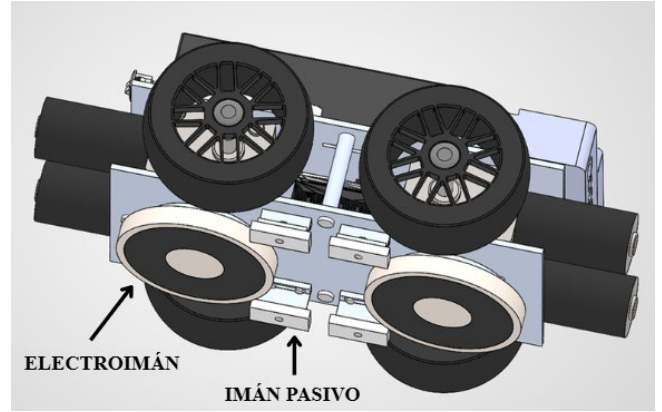


Figura 4: Sistema de adherencia magnética.

2.3. Sistema de locomoción y estructura mecánica

El sistema de locomoción está formado por cuatro ruedas motrices accionadas mediante motorreductores DC de 12 V, seleccionados por su elevado par a bajas velocidades. En concreto, se emplean motores JGB37-520 con una velocidad nominal de 12 rpm, un par aproximado de 6,87 N·m y una corriente nominal inferior a 1,6 A. Esta configuración permite repartir la carga entre los cuatro puntos de apoyo y mejorar la estabilidad del robot durante el desplazamiento vertical sobre superficies metálicas. La velocidad lineal teórica se estima mediante:

$$v = \frac{RPM \cdot \pi \cdot D}{60} \quad (3)$$

considerando una rueda de 85 mm y una velocidad de 12 rpm, se obtiene una velocidad aproximada de $v = 5,34 \text{ cm/s}$, adecuada para tareas de inspección donde se prioriza el desplazamiento lento y controlado frente a la velocidad de avance. Para una masa de diseño cercana a 5 kg, la fuerza tangencial requerida por rueda es de aproximadamente 12,5 N, lo que supone un par mínimo de 0,44 N·m, o 0,88 N·m aplicando un coeficiente de seguridad de 2. Este valor queda ampliamente cubierto por el motor seleccionado.

La estructura mecánica se ha diseñado para integrar de forma compacta los sistemas de tracción, adherencia, alimentación y control, manteniendo una distribución equilibrada de masas y una geometría rígida en la zona inferior del robot. Un aspecto crítico del diseño es la separación entre la superficie de apoyo de las ruedas y la cara inferior de los imanes, ya que el entrehierro condiciona directamente la fuerza magnética disponible. Esta relación se expresa como:

$$F_{efectiva} = k \cdot F_{nominal} \quad (4)$$

donde k representa el porcentaje de fuerza aprovechable en función del entrehierro. Para una fuerza nominal total de 1764 N y un factor efectivo conservador del 30 %, la fuerza de adherencia disponible es 529,2 N. Con un coeficiente de fricción $\mu = 0,5$, la fricción máxima disponible resulta:

$$F_{roz} = \mu \cdot F_{efectiva} = 0,5 \cdot 529,2 = 264,6 \text{ N} \quad (5)$$

lo que proporciona un factor de seguridad de 5,39 frente al deslizamiento para una masa de 5 kg. Por ello, el diseño del chasis debe garantizar que las ruedas mantengan el contacto con la superficie mientras los imanes quedan suficientemente próximos para generar adherencia, pero sin llegar a rozar ni dificultar el avance del robot.

2.4. Estrategia de funcionamiento

La estrategia de funcionamiento implementada busca optimizar el consumo energético y mejorar la eficiencia global del sistema. Durante el desplazamiento normal, el robot utiliza principalmente la adherencia generada por los imanes permanentes, mientras que los electroimanes se activan únicamente en situaciones que requieren un incremento temporal de estabilidad o capacidad de fijación.

En la Figura 5 se representan las principales fuerzas que actúan sobre el robot durante el desplazamiento vertical sobre la superficie metálica. La fuerza de adhesión magnética mantiene el sistema unido a la estructura ferromagnética, generando la fuerza normal necesaria para producir la fricción entre las ruedas y la superficie.

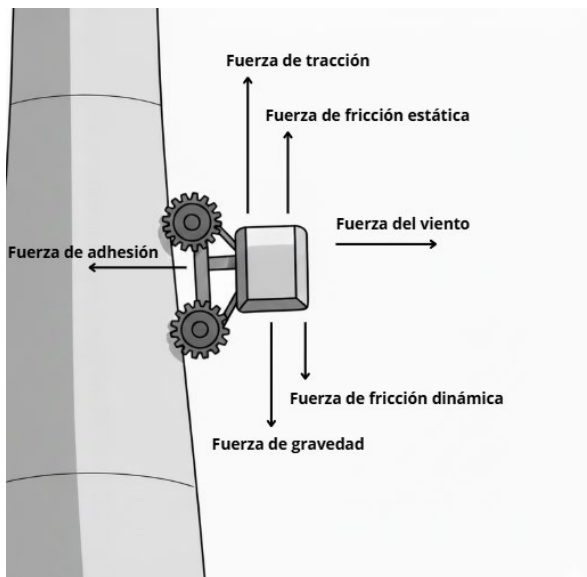


Figura 5. Diagrama de fuerzas del sistema.

Esta fricción permite transmitir la fuerza de tracción generada por los motorreductores y contrarrestar la acción de la gravedad, evitando el deslizamiento del robot durante el ascenso o descenso. Asimismo, se consideran perturbaciones externas como la fuerza del viento, especialmente relevantes en aplicaciones sobre torres eólicas de gran altura.

En aplicaciones sobre turbinas eólicas, especialmente en entornos marinos/offshore, el equilibrio del sistema no depende únicamente del peso del robot, sino también de perturbaciones externas como el viento y las vibraciones estructurales. Por ello, la condición de diseño puede expresarse de forma simplificada como:

$$F_{adh} \cdot \mu \geq mg + F_v \quad (6)$$

donde F_{adh} es la fuerza de adherencia magnética, μ el coeficiente de fricción rueda-superficie, mg el peso del robot y F_v la componente perturbadora asociada al viento. Esta relación muestra que la adherencia no solo debe evitar el desprendimiento del robot, sino también garantizar la tracción suficiente para impedir el deslizamiento vertical.

La combinación de imanes permanentes y electroimanes permite incrementar temporalmente la fuerza de adherencia en situaciones críticas, mejorando la estabilidad del sistema sin necesidad de mantener un elevado consumo eléctrico de forma continua. Esta estrategia reduce el consumo energético y minimiza el calentamiento de los componentes magnéticos, manteniendo simultáneamente un nivel adecuado de seguridad durante el desplazamiento vertical. Además, el diseño desarrollado facilita futuras implementaciones relacionadas con control automático, navegación autónoma e integración de sistemas avanzados de inspección industrial.

3. Arquitectura electrónica y sistema de control

El robot desarrollado integra una arquitectura electrónica orientada al control del sistema de locomoción y del sistema de adherencia magnética, permitiendo coordinar el desplazamiento vertical y la activación selectiva de los electroimanes. El diseño electrónico se ha realizado priorizando la simplicidad de implementación, la modularidad y la posibilidad de ampliación futura mediante sensores y sistemas de navegación autónoma.

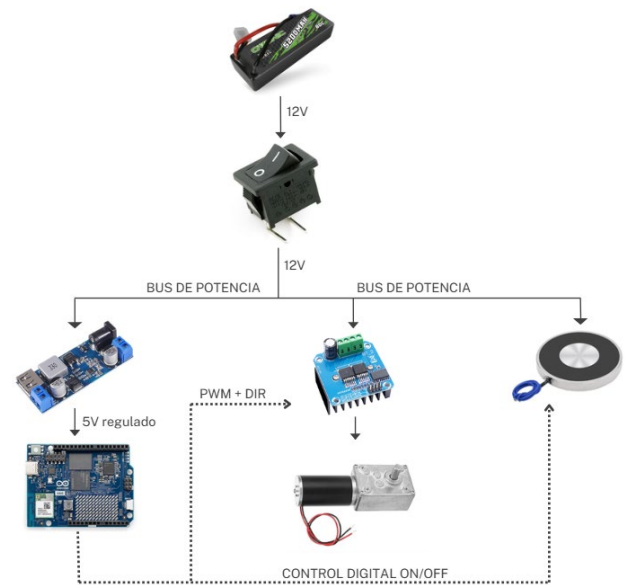


Figura 6: Diagrama de bloques con los componentes seleccionados.

El sistema de control se basa en una plataforma Arduino, encargada de gestionar las señales de control de motores y electroimanes, así como la lógica general de funcionamiento del robot. Esta solución permite desarrollar una arquitectura compacta y fácilmente reproducible en entornos académicos y de investigación.

La alimentación del sistema se realiza mediante batería integrada, proporcionando energía tanto al sistema de tracción como al sistema electrónico y de adherencia. Asimismo, se

incorporan etapas de potencia basadas en transistores MOSFET para la conmutación de los electroimanes, permitiendo controlar cargas de corriente elevada desde señales digitales de bajo nivel generadas por el microcontrolador.

La arquitectura electrónica desarrollada facilita además futuras ampliaciones relacionadas con la incorporación de

sensores de inspección, sistemas de comunicación inalámbrica o algoritmos de navegación autónoma.

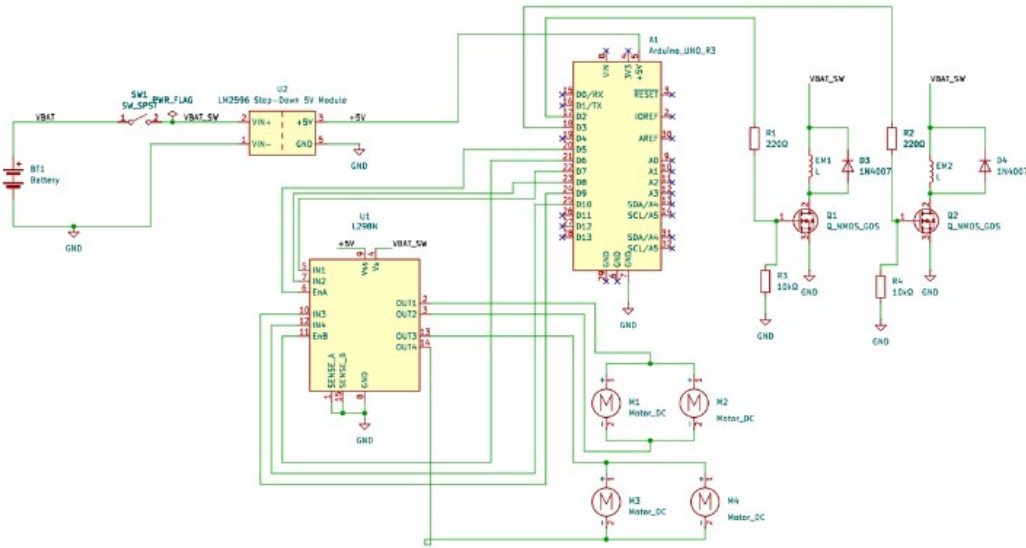


Figura 7: Esquema eléctrico del sistema.

4. Validación preliminar y análisis del diseño

4.1. Validación estructural preliminar

Con el objetivo de verificar la viabilidad del diseño desarrollado, se realizó un análisis preliminar de las condiciones de adherencia y estabilidad del robot sobre superficies metálicas verticales.

Además del análisis teórico, el diseño estructural fue desarrollado mediante modelado CAD y validado preliminarmente mediante simulaciones estructurales orientadas a comprobar la distribución de esfuerzos y deformaciones sobre el chasis del robot. Estas simulaciones permitieron verificar la viabilidad mecánica de la estructura y la correcta integración de los distintos componentes del sistema.

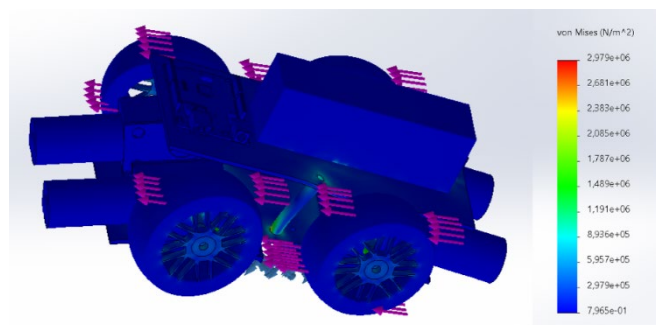


Figura 8: Análisis de fuerza de Von Mises.

4.2. Discusión del diseño desarrollado

El diseño propuesto presenta diversas ventajas para aplicaciones de inspección en turbinas eólicas, especialmente

como base para futuros desarrollos orientados a entornos offshore. La utilización de adherencia magnética híbrida permite combinar elevada capacidad de fijación con un consumo energético reducido, mejorando la eficiencia global del sistema respecto a soluciones basadas exclusivamente en electroimanes o sistemas de vacío (Chen et al., 2020).

Asimismo, la arquitectura modular desarrollada facilita futuras ampliaciones relacionadas con la integración de sensores de inspección, visión artificial o navegación autónoma. El empleo de componentes comerciales y tecnologías de fabricación accesibles permite además desarrollar una plataforma fácilmente reproducible en entornos académicos y de investigación.

Para su aplicación directa en entornos marinos/offshore sería necesario completar el diseño con protección frente a humedad salina, selección de materiales resistentes a la corrosión, sellado de los componentes electrónicos y validación experimental bajo cargas de viento y vibraciones.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema desarrollado constituye una plataforma viable para aplicaciones de inspección robotizada sobre estructuras metálicas verticales, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones en robótica móvil y mantenimiento predictivo industrial.

5. Conclusiones

El presente trabajo ha presentado el diseño de un robot trepador magnético orientado a aplicaciones de inspección en turbinas eólicas. El sistema desarrollado combina locomoción motorizada y adherencia magnética híbrida mediante imanes permanentes y electroimanes de activación

selectiva, permitiendo el desplazamiento sobre superficies metálicas verticales de forma estable y eficiente.

El diseño mecánico realizado mediante herramientas CAD ha permitido desarrollar una estructura compacta y modular capaz de integrar los distintos sistemas de tracción, adherencia y control electrónico. Asimismo, la arquitectura electrónica implementada proporciona una base funcional para el control del robot y futuras ampliaciones relacionadas con navegación autónoma, sensorización avanzada o inspección automatizada.

Los análisis preliminares realizados muestran la viabilidad técnica del sistema desarrollado, verificando la capacidad de adherencia y estabilidad necesarias para el desplazamiento vertical sobre superficies ferromagnéticas. La utilización de una arquitectura híbrida de adherencia permite además mejorar el equilibrio entre consumo energético, seguridad y capacidad de fijación.

El trabajo desarrollado constituye una base inicial para futuras investigaciones relacionadas con robots trepadores aplicados al mantenimiento predictivo e inspección industrial. Como líneas futuras de desarrollo destacan la construcción completa del prototipo físico, la validación experimental en condiciones reales, la incorporación de sensores de inspección no destructiva y el desarrollo de sistemas de navegación autónoma y visión artificial.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido parcialmente financiado por los Proyectos MCI AEI/FEDER PDI2021-123543OB-C21 y AEI/FEDER PID2024-155653OB-C21 del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

Referencias

- Chen, J., Wang, S., Xie, H., 2020. Design and modeling of a permanent magnetic adhesion mechanism for wall-climbing robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67(11), 9390–9399.
- Fang, Y., Wang, S., Bi, Q., Cui, D., Yan, C., 2022. Design and technical development of wall-climbing robots: A review. *Journal of Bionic Engineering* 19(4), 877–901.
- Fernández García, G., Peñacoba Yagüe, M., Sierra García, J. E., & Menéndez García, A., 2026. Análisis comparativo de las tecnologías de adhesión y locomoción para un sistema trepador en turbinas eólicas. VII International Workshop on Wind (and) Waves Energy (WWWE 2026).
- Franko, J., Du, S., Kallweit, S., Duelberg, E., Engemann, H., 2020. Design of a multi-robot system for wind turbine maintenance. *Energies* 13(10), 2552.
- Lee, G., Kim, J., Lee, J., 2018. Magnetic wheel design optimization for wall-climbing robots based on magnetic force analysis. *Journal of Field Robotics* 35(7), 1032–1045.
- Li, X. D., Zhao, F. K., Meng, D. M., Zhang, J. L., 2023. Design and force analysis of a novel propeller-driven wall-climbing robot. *Journal of Field Robotics* 40(1), 127–142.
- Memari, M., Shakya, P., Shekaramiz, M., Seibi, A. C., & Masoum, M. A. (2024). Review on the advancements in wind turbine blade inspection: Integrating drone and deep learning technologies for enhanced defect detection. *IEEE Access*, 12, 33236–33282.
- Pfaffel, S., Faulstich, S., Rohrig, K., 2017. Performance and reliability of wind turbines: A review. *Energies* 10(11), 1904.
- Ryu, J., Kim, S., Park, S., Lee, D., Jo, J., Shim, D., 2024. Design and analysis of propeller-based wall-climbing robot. *International Journal of Internet, Broadcasting and Communication* 16(2), 181–193.
- Sahbel, A., Abbas, A., Sattar, T., 2019. System design and implementation of wall climbing robot for wind turbine blade inspection. *Proceedings of the International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering*, 242–247.
- Sattar, T. P., Leon Rodriguez, H., Bridge, B., 2009. Climbing ring robot for inspection of offshore wind turbines. *Industrial Robot* 36(4), 326–330.