

## Adhesión y locomoción en robots para turbinas marinas

Fernández, G.<sup>a</sup>, Sierra, J.E.<sup>a</sup>, Peñacoba, M.<sup>a</sup>

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

### Resumen

Este trabajo presenta un análisis de viabilidad y un estudio comparativo de estrategias de adhesión y mecanismos de locomoción para el diseño de un Sistema Robótico Trepador (SRT) destinado a la inspección no destructiva (NDT) de torres de turbinas eólicas marinas. El entorno offshore impone condiciones más exigentes, como corrosión, humedad, bioincrustaciones y cargas dinámicas elevadas por viento y oleaje. Se evalúan tres tecnologías de adhesión (magnética, ventosas selladas y presión negativa activa) y tres configuraciones de locomoción (ruedas, orugas y patas articuladas). Se desarrolla un modelo dinámico que estima la fuerza de sujeción necesaria en función de la carga útil, la rugosidad superficial y las perturbaciones ambientales. Asimismo, se analiza la capacidad de cada cinemática para superar discontinuidades estructurales y mantener estabilidad bajo vibraciones. Los resultados indican que la adhesión magnética reforzada y los sistemas de orugas selladas ofrecen mayor robustez y seguridad operativa en estructuras metálicas marinas. Se propone una arquitectura óptima orientada al mantenimiento predictivo offshore.

*Palabras clave:* Robot Trepador, Adhesión Magnética, Presión Negativa, Locomoción Robótica, Inspección No Destructiva (NDT), Turbina Eólica Marina, Mantenimiento Offshore,

### Adhesion and Locomotion in Robots for Offshore Wind Turbines

#### Abstract

This work presents a feasibility analysis and comparative study of adhesion strategies and locomotion mechanisms for the design of a Climbing Robotic System (CRS) intended for non-destructive testing (NDT) of offshore wind turbine towers. The offshore environment imposes demanding conditions, including corrosion, high humidity, biofouling, and increased dynamic loads caused by wind and wave action. Three adhesion technologies (magnetic adhesion, sealed suction cups, and active negative pressure systems) and three locomotion configurations (wheels, tracks, and articulated legs) are evaluated. A dynamic force model is developed to estimate the required attachment force as a function of payload, surface roughness, and environmental disturbances. Additionally, each locomotion mechanism is assessed in terms of obstacle negotiation capability and stability under structural vibrations. Results indicate that reinforced magnetic adhesion combined with sealed tracked systems provides the highest robustness and operational safety on marine steel structures. An optimal system architecture is proposed to support predictive maintenance in offshore wind farms.

*Keywords:* Climbing Robot, Magnetic Adhesion, Negative Pressure Adhesion, Robotic Locomotion, Non-Destructive Testing (NDT), Offshore Wind Turbine, Marine Automation, Predictive Maintenance

## 1. Introducción

El sector de la energía eólica marina se ha convertido en un componente estratégico de la transición energética global, debido a su elevado potencial de generación. Sin embargo, el aumento en dimensiones y complejidad estructural de las turbinas offshore ha incrementado las exigencias de mantenimiento e inspección, especialmente en torres expuestas a corrosión, humedad salina, viento y oleaje. La inspección manual en estos entornos resulta costosa, lenta y con alto riesgo operativo, lo que motiva la adopción de soluciones automatizadas [1].

En este contexto, los Sistemas Robóticos Trepadores (SRT) emergen como alternativa para la inspección remota y no destructiva. No obstante, su desempeño depende críticamente de la fiabilidad de la adhesión y la locomoción sobre superficies metálicas sometidas a vibraciones, irregularidades y condiciones ambientales adversas [2]. El diseño de un SRT offshore requiere garantizar suficiente fuerza de sujeción frente a cargas dinámicas sin comprometer tracción ni eficiencia energética [3,4].

Diversas tecnologías de adhesión han sido exploradas, como la magnética, la basada en vacío y los sistemas de presión negativa activa, cada una con ventajas y limitaciones en

entornos marinos [5–8]. Asimismo, las configuraciones de locomoción (ruedas, orugas o patas) influyen en la estabilidad y capacidad para superar discontinuidades estructurales. Sin embargo, no existe un estudio comparativo integral centrado específicamente en turbinas eólicas marinas [9].

Este trabajo aborda dicha brecha mediante un análisis de viabilidad y una comparación sistemática de tres tecnologías de adhesión, empleando un modelo de fuerzas dinámicas que incorpora perturbaciones ambientales offshore. Se evalúan los criterios de sujeción, tracción y estabilidad para identificar la arquitectura más robusta y eficiente, estableciendo una base para el diseño optimizado de SRT destinados al mantenimiento predictivo en parques eólicos marinos.

El artículo se organiza en cinco secciones: fundamentos teóricos, metodología y modelo dinámico, resultados comparativos, discusión de la arquitectura óptima y conclusiones con líneas futuras de investigación.

## 2. Fundamentos teóricos de las tecnologías de adhesión y locomoción

### 2.1 Adhesión magnética

La adhesión magnética es una de las técnicas más empleadas para la inspección de estructuras metálicas ferromagnéticas, como las torres de turbinas eólicas marinas. Este método ofrece alta capacidad de carga y elevada fiabilidad, sin consumo energético continuo en el caso de imanes permanentes.

La fuerza de sujeción normal  $F_N$  generada por un imán sobre una superficie ferromagnética plana puede aproximarse mediante la expresión derivada de las ecuaciones de Maxwell:

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

donde  $B$  es la densidad de flujo magnético (T),  $A$  el área efectiva de contacto ( $m^2$ ) y  $\mu_0$  la permeabilidad del vacío ( $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ ).

En aplicaciones offshore, la presencia de recubrimientos anticorrosivos, capas de pintura epoxi y corrosión superficial introduce un entrehierro efectivo que reduce significativamente la fuerza de sujeción, al depender ésta inversamente de la distancia al material ferromagnético [10,11].

Para electroimanes, considerando un entrehierro  $g$ , la fuerza puede expresarse como:

$$F = \frac{(N \cdot I)^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{2 \cdot g^2} \quad (2)$$

donde  $N$  es el número de espiras,  $I$  la corriente y  $g$  el entrehierro. Esta configuración permite control activo, aunque implica consumo energético continuo y gestión térmica.

### 2.2 Adhesión por vacío

La adhesión por vacío es independiente del material estructural siempre que la superficie sea suficientemente lisa y no porosa. La fuerza de sujeción viene dada por:

$$F_N = \Delta P \cdot A_v = (P_{atm} - P_{int}) \cdot A_v \quad (3)$$

donde  $A_v$  es el área efectiva de sellado y  $\Delta P$  el gradiente de presión.

En entornos marinos, la humedad, la salinidad y la rugosidad superficial pueden comprometer el sellado, incrementando fugas y reduciendo la fuerza efectiva. Además, la viabilidad energética depende de la potencia requerida por la bomba de vacío:

$$Pot = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta} \quad (4)$$

donde  $Q$  es el caudal volumétrico y  $\eta$  la eficiencia del sistema. El consumo continuo representa una limitación importante para la autonomía del robot.

### 2.3 Adhesión por presión negativa asistida por hélice

La adhesión por flujo de aire dinámico emplea un propulsor en un conducto parcialmente sellado para generar una región de baja presión sin requerir contacto hermético. La fuerza de sujeción puede aproximarse como:

$$F_N \propto \Delta P \cdot A_e \quad (5)$$

donde  $A_e$  es el área efectiva del conducto.

Este método presenta mayor tolerancia a irregularidades y discontinuidades superficiales, lo que resulta ventajoso en estructuras marinas con soldaduras y corrosión. Sin embargo, requiere elevada potencia para mantener el régimen de giro y debe compensar no solo el peso del robot, sino también fuerzas aerodinámicas externas y vibraciones estructurales inducidas por viento y oleaje [13,14].

### 2.4 Condición general de equilibrio y criterios de diseño

En términos generales, la viabilidad de cada tecnología de adhesión puede evaluarse mediante la condición de equilibrio vertical:

$$F_N \cdot \mu \geq W + F_{wind} + F_{dyn} \quad (6)$$

donde  $F_N$  es la fuerza normal de adhesión (N),  $W$  es el peso del robot (N),  $\mu$  es el coeficiente de fricción efectivo en condiciones marinas,  $F_{wind}$  es la fuerza aerodinámica debida al viento (N) y  $F_{dyn}$  las fuerzas dinámicas adicionales (N).

Esta relación integra los efectos de sujeción, fricción y perturbaciones ambientales, y servirá como base para el modelo dinámico desarrollado en la Sección III.

La Figura 1 muestra un esquema conceptual del uso de robots trepadores en turbinas offshore con una imagen por cada tipo de tecnología comentada.

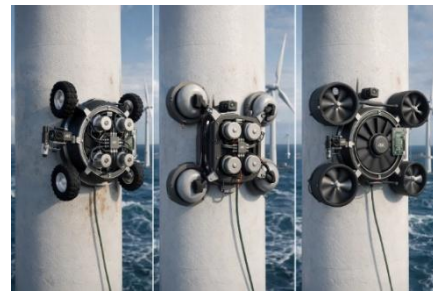


Figura 1: Idea conceptual de robots en turbinas offshore.

### 3. Metodología de análisis y supuestos de diseño

En esta sección se presentan el análisis y los supuestos de diseño utilizados para evaluar la viabilidad de las seis combinaciones entre tecnologías de adhesión y configuraciones de locomoción en turbinas eólicas marinas. El objetivo es determinar la capacidad de cada arquitectura robótica para resistir cargas ambientales características del entorno offshore y desplazarse de forma segura sobre la superficie vertical curvada de la torre.

#### 3.1 Cargas de diseño en entorno offshore

A diferencia del contexto terrestre, en aplicaciones marinas el sistema debe contrarrestar:

- Peso del robot  $W = mg$
- Fuerza aerodinámica debida al viento  $F_{wind}$
- Fuerzas dinámicas adicionales  $F_{dyn}$ , asociadas a vibraciones estructurales inducidas por viento, oleaje y resonancias locales.

La fuerza de viento máxima se modela como:

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A_{exp} V_{w,max}^2 \quad (7)$$

donde  $\rho_{air}$  es la densidad del aire,  $C_d$  el coeficiente aerodinámico,  $A_{exp}$  el área frontal expuesta y  $V_{w,max}$  la velocidad máxima de viento de diseño.

La fuerza normal requerida para evitar la separación viene dada por:

$$F_{N,req} = F_{w,max} + F_{dyn} \quad (8)$$

La Figura 2 ilustra el diagrama de fuerzas considerado en el modelo.

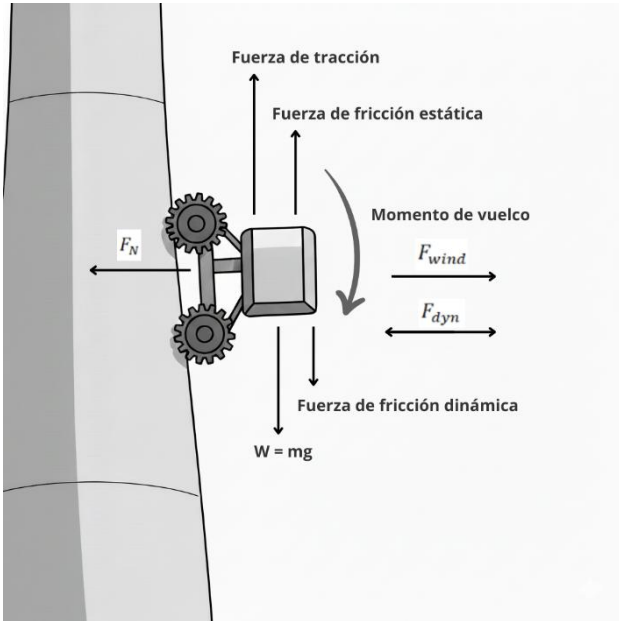


Figura 2: Fuerzas sobre robot en estructura offshore

#### 3.2 Criterios de robustez

La robustez se cuantifica mediante factores de seguridad mínimos  $FS \geq 1.5$ .

#### Factor de Seguridad de Adhesión (FSA)

El factor de seguridad de adhesión evalúa la capacidad del sistema para evitar la separación de la superficie. Se define como:

$$FSA = \frac{F_N}{W + F_{wind} + F_{dyn}} \quad (9)$$

donde  $F_N$  es la fuerza normal de adhesión y  $W + F_{wind} + F_{dyn}$  representa la carga total que tiende a separar el robot de la superficie. Para garantizar la estabilidad, debe cumplirse:

$$FSA \geq 1.5$$

#### Factor de Seguridad de Tracción (FST)

Evita el deslizamiento vertical:

$$FST = \frac{\mu F_N}{W + F_{wind} + F_{dyn}} \geq 1.5 \quad (10)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción efectivo en condiciones marinas (considerando humedad y salinidad).

La fuerza mínima de adhesión requerida por tracción resulta:

$$F_{adh,req} = \frac{FS \cdot W}{\mu} \quad (11)$$

#### 3.3 Efecto de la curvatura de la torre

Las torres offshore presentan radios de curvatura elevados pero relevantes para tecnologías sensibles al entrehierro (magnética y vacío).

Se introduce un factor de corrección simplificado  $k_c$  tal que:

$$F_{adh,eff} = k_c \cdot F_{adh,ideal} \quad (12)$$

donde  $k_c < 1$  representa la pérdida de fuerza debida a contacto no uniforme y microseparaciones inducidas por curvatura y rugosidad.

Tabla 1: Parámetros de cálculo y supuestos

Parámetro	Símbolo	Valor típico
Masa del robot	m	10–20 kg
Peso del robot	W	100–200 N
Densidad del aire	$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Coficiente aerodinámico	$C_d$	1.0–1.2
Área frontal	A	0.1–0.3 m <sup>2</sup>
Velocidad del viento	v	10–25 m/s
Coficiente de fricción	$\mu$	0.3–0.6
Factor de corrección por curvatura	$k_c$	0.8–1.0

### 3.3 Validación preliminar en entorno de simulación

Con el objetivo de verificar de forma preliminar el comportamiento dinámico del modelo propuesto, se implementó un entorno de simulación en Webots, reproduciendo la geometría curva de una torre eólica marina y condiciones de fricción representativas del entorno offshore.

En el entorno virtual se modeló el robot trepador con un sistema de adhesión equivalente mediante la aplicación de fuerzas normales controladas sobre una superficie cilíndrica, incorporando además perturbaciones laterales variables que simulan ráfagas de viento.

Las pruebas realizadas permitieron monitorizar en tiempo real el equilibrio de fuerzas y verificar la condición de no deslizamiento bajo los parámetros definidos en la Sección III, mostrando coherencia entre el modelo analítico y el comportamiento dinámico observado en simulación.

La Figura 3 muestra una vista del entorno de simulación de forma esquemática con un ejemplo de lo que se podría implementar.

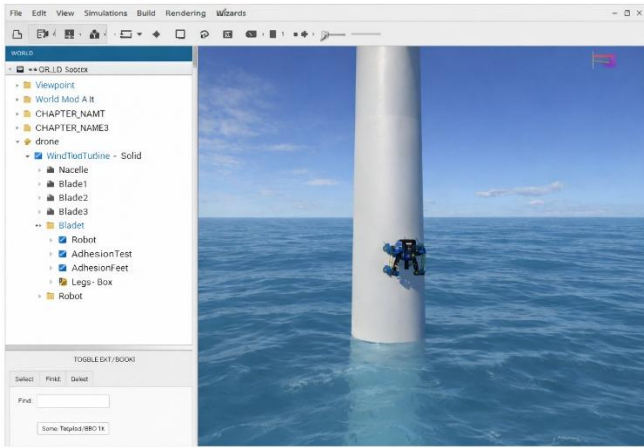


Figura 3:Entorno de simulación

## 4. Análisis de Resultados y Arquitectura de Diseño

### 4.1 Validación bajo condiciones offshore

El análisis se realiza considerando las siguientes condiciones de diseño representativas del entorno offshore:

- Velocidad máxima de viento:  $V_{w,max} = 25 \text{ m/s}$
- Masa del robot:  $m = 15 \text{ kg}$
- Peso:  $W = 147.15 \text{ N}$
- Coeficiente de fricción en superficie húmeda:  $\mu = 0.5$
- Factor de seguridad mínimo:  $FS = 1.5$

La fuerza de separación máxima viene dada por:

$$F_{sep,max} = F_{w,max} + F_{dyn} \quad (13)$$

Para cumplir el criterio de adhesión:

$$F_{adh,req}^{(adh)} = FS \cdot F_{sep,max} \quad (14)$$

No obstante, la condición más restrictiva corresponde al criterio de tracción vertical:

$$F_{adh,req}^{(trac)} = \frac{FS \cdot W}{\mu} \quad (15)$$

Finalmente, el criterio general de viabilidad estructural es:

$$F_{adh,max} \geq F_{adh,req} \quad (16)$$

El análisis numérico muestra que la condición de tracción domina el diseño, exigiendo una fuerza de adhesión superior a la requerida únicamente para contrarrestar la separación por viento.

### 4.2 Resultados comparativos de adhesión

Tabla 2: Resultados de adhesión

Tecnología de Adhesión	$F_{max}$ Estimada (N)	Cumple FSA	Cumple FST
Magnética (imanes)	200–300	Parcial	No
Vacío (ventosas)	150–250	No	No
Presión negativa (hélice)	350–450	Sí	Sí

Para los parámetros empleados la adhesión por presión negativa asistida por hélice es la única que satisface estrictamente ambos factores de seguridad bajo condiciones extremas offshore.

La adhesión magnética presenta un rendimiento marginal para el criterio de tracción, aunque puede volverse viable mediante optimización del diseño (incremento de área magnética o reducción de masa).

La adhesión por vacío resulta insuficiente bajo las condiciones consideradas debido a pérdidas de sellado en superficies húmedas y rugosas.

### 4.3 Impacto energético y viabilidad operacional

Desde el punto de vista estructural, la adhesión por hélice presenta la mayor robustez. No obstante, su evaluación operacional revela varias limitaciones. En primer lugar, presenta un consumo energético específico elevado, lo que reduce significativamente la autonomía del sistema. Además, introduce una mayor complejidad mecánica y una elevada sensibilidad a condiciones aerodinámicas externas.

Por el contrario, la adhesión magnética basada en imanes permanentes no requiere consumo energético continuo y ofrece una alta fiabilidad mecánica. Sus limitaciones estructurales pueden mitigarse mediante el incremento del área o número de imanes, la reducción de la masa total del robot, la optimización de la distribución de carga o la operación bajo condiciones meteorológicas controladas.

### 4.4 Evaluación de mecanismos de locomoción

La comparación de las configuraciones de locomoción se realiza considerando estabilidad, capacidad para superar discontinuidades ( $\sim 1 \text{ cm}$ ), eficiencia energética y comportamiento ante vibraciones.

Los sistemas de ruedas presentan alta velocidad y eficiencia, pero limitada capacidad para superar discontinuidades y menor estabilidad ante vibraciones. Las patas articuladas ofrecen mayor adaptabilidad, aunque con elevada complejidad mecánica y baja velocidad de inspección. Por su parte, las orugas proporcionan una mejor distribución de carga, mayor estabilidad y una transición más robusta sobre juntas, manteniendo una velocidad aceptable. En consecuencia, las orugas se consideran la solución más equilibrada para entorno offshore.

La Figura 4 presenta una representación conceptual de la arquitectura robótica propuesta.



Figura 4: Idea visual del robot propuesto

#### 4.5 Arquitectura de diseño óptima

Considerando los requisitos de adhesión, el criterio de tracción dominante, el consumo energético, la robustez mecánica en ambiente salino, la capacidad de superar discontinuidades y la estabilidad ante vibraciones, se concluye que la arquitectura más viable es la adhesión magnética combinada con locomoción por orugas.

Esta configuración minimiza el consumo energético continuo, permite escalabilidad mediante refuerzo magnético, mantiene estabilidad estructural adecuada, reduce la complejidad mecánica y ofrece mayor mantenibilidad. Aunque la adhesión por hélice presenta mayor capacidad estructural, su penalización energética la hace menos adecuada para inspecciones prolongadas.

#### 4.6 Limitaciones del modelo

El modelo presenta varias limitaciones, entre ellas la no consideración del impacto directo de oleaje extremo, el uso de un coeficiente de fricción estimado en condiciones húmedas, la ausencia de un análisis modal detallado de vibraciones estructurales y la falta de validación experimental a escala real. No obstante, el enfoque adoptado es conservador y proporciona una base adecuada para el diseño preliminar.

## 5. Conclusiones

El análisis comparativo realizado evidencia que, bajo condiciones offshore severas, la condición de tracción domina

el diseño estructural del SRT, imponiendo requisitos de adhesión superiores a los derivados exclusivamente de la separación por viento. Aunque la adhesión por presión negativa asistida por hélice cumple estrictamente los factores de seguridad definidos, su elevado consumo energético limita su viabilidad para inspecciones prolongadas. En contraste, la adhesión magnética, combinada con un sistema de locomoción por orugas, ofrece el mejor compromiso entre robustez estructural, eficiencia energética y estabilidad dinámica en superficies curvas y húmedas.

El modelo propuesto constituye una base preliminar para el dimensionamiento de robots trepadores en entornos marinos y puede extenderse mediante validación experimental y análisis dinámico avanzado que incorpore efectos modales y cargas transitorias extremas.

## Referencias

- [1] Pfaffel, S., Faulstich, S., & Rohrig, K. (2017). Performance and reliability of wind turbines: A review. *energies*, 10(11), 1904.
- [2] Prahlad, H., Pelrine, R., Stanford, S., Marlow, J., & Kornbluh, R. (2008, May). Electroadhesive robots—wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology. In 2008 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 3028-3033). IEEE.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Sahbel, A., Abbas, A., & Sattar, T. (2019, February). System design and implementation of wall climbing robot for wind turbine blade inspection. In 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE) (pp. 242-247). IEEE.
- [6] Sattar, T. P., Leon Rodriguez, H., & Bridge, B. (2009). Climbing ring robot for inspection of offshore wind turbines. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(4), 326-330.
- [7] Hao, W., Wang, L., Dong, X., Zhu, C., & Zhang, S. (2025, October). Structural design and validation of a vacuum-adhesion wall-climbing robot for wind turbine towers. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 3133, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- [8] 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*, 181-193.
- [9] 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.
- [10] 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. 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.
- [11] 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.
- [12] Zhang, Y., Du, F., & Li, Y. (2019). A bio-inspired multi-rotor wall-climbing robot using ducted fans for vertical surface attachment. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24(3), 1184-1194.
- [13] Maiolino, P. (2014). Análise dinâmica de turbina eólica offshore do tipo monocolumna. COPPE/UF RJ. Rio de Janeiro.
- [14] Tomás Rodríguez, M., Elshaghir, T., Hashi, S., & Santos Peñas, M. (2018). Análisis de vibraciones en turbinas marinas.