

Tipo de artículo: artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/uct.v29i127.969>

Tendencias en mantenimiento de parques eólicos marinos

María Gabriela Mora Carvajal
<https://orcid.org/0000-0001-7734-9989>
mgabrielamc@hotmail.com
Autor independiente
San José, Costa Rica

William Castro Villegas
<https://orcid.org/0000-0003-3665-9678>
william_1809@hotmail.es
Autor independiente
San José, Costa Rica

Minor Rojas Solís
<https://orcid.org/0000-0003-0427-145X>
mrojass@cfia.or.cr
Autor independiente.
San José, Costa Rica

Edwin Amador Guzmán
<https://orcid.org/0000-0002-6018-4951>
amadoredwin@hotmail.com
Autor independiente
San José - Costa Rica

Gustavo Richmond-Navarro*
<https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
grichmond@tec.ac.cr
Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Cartago, Costa Rica

*Autor de correspondencia: grichmond@tec.ac.cr

Recibido (04/02/2025), Aceptado (07/04/2025)

Resumen: El presente estudio examinó el uso y las tendencias de mantenimiento de aerogeneradores offshore, ante la creciente necesidad de fuentes energéticas y la limitación de los combustibles fósiles. Se realizó una revisión de literatura en Google Scholar, enfocándose en documentos publicados entre 2020 y 2025, utilizando términos clave como "wind energy offshore" y "mantenimiento de aerogeneradores offshore". Los resultados revelaron que, si bien la energía eólica marina tiene un gran potencial y ha experimentado un crecimiento significativo, su desarrollo enfrenta desafíos relacionados con los costos de operación y mantenimiento. Se analizaron las etapas de desarrollo de parques eólicos marinos y diferentes estrategias de mantenimiento, incluyendo el mantenimiento oportunista y el basado en condición, destacando la importancia del monitoreo de la salud estructural y la anticipación de fallas para optimizar la confiabilidad y reducir los costos.

Palabras clave: parques eólicos marinos, mantenimiento, energía eólica, Costa Rica.

Trends in offshore wind farm maintenance

Abstract.- The objective of this study was to evaluate the risk-adjusted performance of a sample of 34 Chilean mutual funds, applying different financial indicators. The funds analyzed were classified into three categories, according to the composition of assets they incorporate, and six indices were applied: Treynor, Sharpe, Jensen's Alpha, Sortino, Information and Modigliani. Finally, the correlation between the results obtained was analyzed. It was shown that Aggressive Allocation mutual funds are those with the highest profitability and risk, but the best risk-adjusted performance. The Cautious Allocation funds showed the opposite results. Finally, a high positive correlation was shown between the results delivered by the different efficiency indices, except for the Treynor index.

Keywords: offshore wind farms, maintenance, wind energy, Costa Rica.



I. INTRODUCCIÓN

El ser humano requiere del uso de fuentes energéticas diariamente para cubrir las necesidades más básicas; resulta inimaginable, por ejemplo, llevar agua potable a todos los hogares sin la utilización de un sistema de bombeo que requiere energía para funcionar. La preparación de los alimentos es otro ejemplo de actividades básicas del ser humano, que requieren del uso de fuentes energéticas.

El sistema energético global aún depende en gran medida de los combustibles fósiles, los cuales no solo generan una gran cantidad de gases de efecto invernadero, sino que también son recursos finitos. Esta limitación llevará a un drástico aumento de precios y a una reducción en la producción de energía, lo que impedirá satisfacer el consumo actual de la sociedad bajo el modelo vigente. Para satisfacer la demanda energética, es esencial invertir en energías renovables, ya que son una fuente inagotable de energía y emiten menos gases de efecto invernadero y residuos tóxicos. Estas fuentes de energía son cruciales para asegurar un desarrollo sostenible que permita satisfacer nuestras necesidades energéticas presentes y futuras sin dañar el medio ambiente [1].

Sin embargo, el crecimiento de energías alternativas ha sido notorio en la última década, pasando de ser un 8,7 % del consumo de energía mundial a un 11,2 % entre el año 2009 y el 2019, no obstante, este crecimiento no representa un impacto considerable en el uso eficiente del consumo energético del mundo, cuyo principal consumo siguen siendo los combustibles fósiles, que pasaron de ser de un 80,3%, a un 80,2 %, representando una reducción de menos de un punto porcentual en el mismo periodo [2].

En este trabajo se aborda el uso de aerogeneradores offshore y las tendencias en mantenimiento para este tipo de máquinas. Para ello se ha estructurado este trabajo con una sección introductoria, una sección de desarrollo con los fundamentos teóricos, seguido de una sección de metodología que muestra los procesos de esta investigación, finalmente se presentan los resultados y conclusiones.

II. DESARROLLO

La capacidad global de utilización de energía eólica y solar se duplicó desde el año 2015, hasta el año 2020 [3]. Durante el año 2020, a pesar de las grandes interrupciones asociadas con la pandemia mundial y el colapso del producto interno bruto (PIB), la energía eólica y la capacidad solar aumentó en unos 238 GW, un 50% más que en cualquier momento [3]. Aún falta mucho por hacer y la energía eólica terrestre será la gran protagonista con un alto potencial y un bajo factor de emisiones de gases de efecto invernadero (33,5 tCO₂ / GWh) [4].

Sin embargo, la energía eólica marina será un pilar central de la transición energética mundial. El potencial de la energía eólica marina, fija y flotante, se calcula en más de 71 000 GW de recursos eólicos marinos extraíbles alrededor del mundo, con más del 70 % presente en aguas más profundas, adecuadas para turbinas eólicas marinas flotantes [4].

A. El contexto de Costa Rica

En Costa Rica se han realizado estimaciones preliminares que indican que el país cuenta con 17 GW de potencial de recursos técnicos en energía eólica marina [4], el desarrollo de este potencial aportaría un incremento en la economía de la zona costera donde se emplace cualquier proyecto de este tipo, tema por analizar desde el punto de vista de impacto social con este tipo de proyectos, debido a que el emplazamiento de estos parques implica un desarrollo en la infraestructura portuaria aledaña.

Existe un impacto económico que conlleva la instalación de aerogeneradores offshore y el aprovechamiento de la energía eólica marina, ya que se dice que es un instrumento para el crecimiento económico de las zonas costeras y genera empleos que podrían mantenerse durante los 25 años de vida útil de un proyecto, revitalizando las comunidades costeras del área de influencia [4].

Por otro lado, el invertir en la energía eólica marina hoy en día es antieconómico a pesar del importante apoyo financiero. Los parámetros vitales para considerar disminuir la brecha en la falta de rentabilidad son los costos, el factor de carga y los costos de operación y mantenimiento.

Por lo tanto, esta revisión tiene como objetivo abordar la energía eólica, resumiendo el estado del arte de su impacto e importancia en el mundo. Esto es realizado a través de la revisión de los posibles emplazamientos y tecnologías que permitan el mayor aprovechamiento teórico-práctico del recurso eólico-marino de acuerdo con los estudios de potencial eólico, de batimetría del sitio (estudio de las profundidades marinas, que permite obtener información detallada sobre la forma y estructura del lecho marino), logística de transporte e instalación. Por otra parte, se expone la clasificación de los aerogeneradores disponibles de acuerdo con sus cimientos o subestructuras.

III. METODOLOGÍA

La revisión de literatura se realizó con la herramienta de búsqueda Google Scholar. La búsqueda se realizó utilizando las cadenas “wind energy offshore”, “desarrollo y diseño aerogeneradores offshore” y “tendencias en operación y mantenimiento de aerogeneradores tipo offshore” en documentos de tipo artículo de revista, publicados en el periodo 2020-2025.

Entre los artículos obtenidos, se seleccionaron aquellos publicados en revistas indexadas en Scopus dentro de los cuartiles 1 y 2, asegurando así su relevancia e impacto en la comunidad científica. Además, se incluyeron únicamente publicaciones del periodo 2020-2025. La calidad de los artículos seleccionados se evaluó con base en su clasificación en los cuartiles de Scopus, ya que estar en los primeros dos cuartiles indica un alto número de citaciones y un reconocimiento dentro del campo. Además, al estar indexadas en Scopus, estas revistas garantizan un proceso de revisión por pares, lo que refuerza la validez científica de los artículos seleccionados. La única excepción a este criterio se hizo respecto del artículo referente de forma específica al caso de Costa Rica. Los principales artículos encontrados que responden a estos criterios se presentan en la Tabla 1.

Las preguntas de investigación que guiaron la selección de artículos se centraron en comprender las tendencias y desafíos en el desarrollo y mantenimiento de parques eólicos marinos. En particular, se buscó responder: ¿Cómo ha evolucionado la expansión en parques eólicos marinos en términos de planificación, instalación y operación?, ¿Qué estrategias de mantenimiento han demostrado ser más efectivas para optimizar costos y mejorar la confiabilidad en parques eólicos marinos?, ¿Cuál es el impacto de la digitalización y el análisis de datos en la gestión del mantenimiento? Para abordar esta última cuestión, se exploraron metodologías como el mantenimiento basado en condición y el mantenimiento oportunista.

Tabla 1. Principales investigaciones encontradas con relación al tema.

Autores	Revista	Año	Aporte a la investigación
J. Kang, C. G. Soares [12]	Ocean Engineering	2020	Explica que el mantenimiento oportunista en parques eólicos marinos optimiza recursos al combinar mantenimientos preventivos y correctivos, equilibrando costos y vida útil
Z. Jiang [5]	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2021	Proporciona una visión estructurada del desarrollo de Parques Eólicos Marinos (PEM) y la importancia de la repotenciación de los parques eólicos
J. R. Rojas Morales y K. Chaves Martínez [6]	Repositorio Científico	2021	Presenta del desarrollo de parques eólicos marinos como una cadena de suministro compleja y estructurada
A. M. Costa, J. A. Orosa, D. Vergara, F. A. Pablo [9]	Applied sciences	2021	Señala que los costos de O&M han disminuido tanto en proyectos eólicos terrestres como marinos, la reducción es menor en los proyectos marinos, lo que plantea un desafío para su competitividad
R. Giovanni, P. R. Thies, L. Johanning [13]	Energies	2021	Exhibe que el monitoreo de parámetros (acústica, humedad, propiedades modales) en parques eólicos marinos se está automatizando con drones y vehículos no tripulados
Y. Hadjoudj, R. Pandit [15]	Energy Science & Engineering	2023	Propone que en el mantenimiento de parques eólicos marinos se optimiza mediante estrategias predictivas, aprendizaje automático y sensores inteligentes
M. El-Naggar, A. Sayed, M. Elshahed, & M. El-Shimy [16]	Applied Sciences	2023	Demuestra que optimizar el mantenimiento de aerogeneradores requiere modelos basados en fallos, datos de campo y estrategias para reducir costos y maximizar disponibilidad.
K. Kong, K. Dyer, C. Payne, I. Hamerton, P.M. Weaver [11]	Renewable Energy Focus	2023	Muestra métodos de monitoreo y mantenimiento para aspas, incluyendo pruebas no destructivas, gemelos digitales y materiales avanzados para detección temprana
Q. D. Feng, J. S. Xia, L. Wen, M. Yazdi [14]	Quality and Reliability Engineering International	2024	Analiza fallos en turbinas eólicas flotantes con Fuzzy FMEA, identificando modos críticos y proponiendo mejoras en diseño, operación y mantenimiento estratégico
M. Farhan, R. Schneider, S. Thöns, M. Gündel [10]	Wind Energy Science	2025	Propone un modelo probabilístico para optimizar costos de mantenimiento en parques eólicos marinos, considerando incertidumbre y factores clave mediante análisis experto

IV. RESULTADOS

A. Desarrollo de parques eólicos marinos

El desarrollo de los proyectos de energía renovable variable, enfocados en la utilización del viento como fuente primaria ha tomado relevancia en la matriz energética del mundo, al punto de considerarse una tendencia, expandir la utilización de este recurso fuera de las costas es un reto para los desarrolladores, sin embargo, aún con su complejidad, la instalación de parques eólicos marinos ha demostrado un incremento no despreciable en países de primer mundo como Reino Unido, Alemania y China [6].

El desarrollo de estos parques no se limita a la parte tecnológica del aprovechamiento del recurso, y al igual que otras tecnologías emergentes necesitan del encadenamiento de suministros adecuado. Dentro de las propuestas para las cadenas de suministros de estos proyectos, están las que se encargan de abordar la planificación, organización y control de aquellas actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes, desde la concepción de un producto hasta llegar al usuario final, se deben tener claros estos puntos con la finalidad de desarrollar un plan estratégico que evite consecuencias indeseables y deficiencias en logística [6].

Se puede analizar el desarrollo de los parques eólicos marinos (PEM), en torno a una cadena dividida en 6 puntos específicos: 1. Desarrollo y gestión del proyecto, 2. Fases de las turbinas, 3. Balance de plantas, 4. Instalación y puesta en marcha del proyecto, 4. Operación y Mantenimiento, 5. Desarme y Cierre [6].

También es posible ver el desarrollo de los PEM de una forma más enfocada al proyecto, esto se logra dividiendo el proceso en 5 etapas [5]: 1. Planificación y producción, 2. Producción y adquisición, 3. Instalación y puesta en marcha, 4. Operación y Mantenimiento, 5. Desmantelamiento y Repotenciación, tal y como se apreciar en la Fig. 1.



Fig. 1. Cinco etapas típicas de un parque eólico Marino [5].

El desmantelamiento de parques eólicos marinos al final de su vida útil operativa es un proceso complejo que implica consideraciones tanto técnicas como ecológicas. Un aspecto clave en este proceso es el impacto que la remoción total o parcial de las estructuras submarinas puede tener sobre los ecosistemas desarrollados durante la fase operativa del parque. La falta de datos concretos sobre estos efectos genera una brecha de conocimiento que dificulta la toma de decisiones informadas en la planificación del desmantelamiento [7]. En otros casos se da la repotenciación del parque eólico, es decir, el reemplazo o actualización de los aerogeneradores, ya sea por el cambio de partes de la turbina o por el cambio completo de esta [5].

B. Generalidades del mantenimiento en parques eólicos marinos

Al tiempo que la energía eólica terrestre se convierte en la gran protagonista de las energías renovables, la energía eólica marina surge como un complemento de gran potencial que ha ido incrementando en el escenario mundial.

Con el rápido crecimiento de la demanda de energía eólica durante la última década y el agotamiento de los recursos terrestres, las turbinas eólicas marinas (OWT), se han convertido en el foco de desarrollo tecnológico de la energía eólica. En comparación con las turbinas eólicas terrestres, las OWT tienen muchas ventajas, por ejemplo, abundantes recursos eólicos, menor turbulencia, espacio sustancial para el establecimiento, menores pérdidas por transmisión y distribución, menor impacto visual y menor contaminación acústica [8].

Sin embargo, no todo son ventajas, las condiciones marinas, ya sea cerca de la costa o en alta mar, presentan algunos desafíos para la operación y principalmente para el mantenimiento de las OWT. Las condiciones salinas del ambiente, la dificultad de acceder a las consolas y a sus elementos, entre otras cosas, hacen que el mantenimiento de estos parques eólicos sea más complejo tanto técnica como logísticamente, por lo tanto, los costos por mantenimiento son más elevados respecto de los parques terrestres.

El costo nivelado de energía (LCOE por sus siglas en inglés) representa el precio medio del ciclo de vida de la electricidad generada a partir de una fuente de energía dada por megavatio-hora, se emplea para comparar diferentes fuentes de energía. En proyectos eólicos terrestres ha disminuido un 45%, mientras que en proyectos marinos un 28%. Los costos de operación y mantenimiento (O&M) de los proyectos eólicos terrestres cayeron un 52%, mientras que en el caso de los proyectos eólicos marinos (offshore), han disminuido un 45% [9].

Se presenta un escenario en el que el mantenimiento de las OWT no solamente es más complejo, sino que también, no es económicamente adecuado para hacer de esta una tecnología competitiva, de la que se puedan aprovechar todas sus bondades.

La Fig. 2 muestra como el LCOE de la energía eólica marina disminuyó en una década de manera general y aunque su desviación respecto al LCOE de la energía eólica terrestre disminuye, el costo nivelado de la energía de la primera sigue siendo mayor.

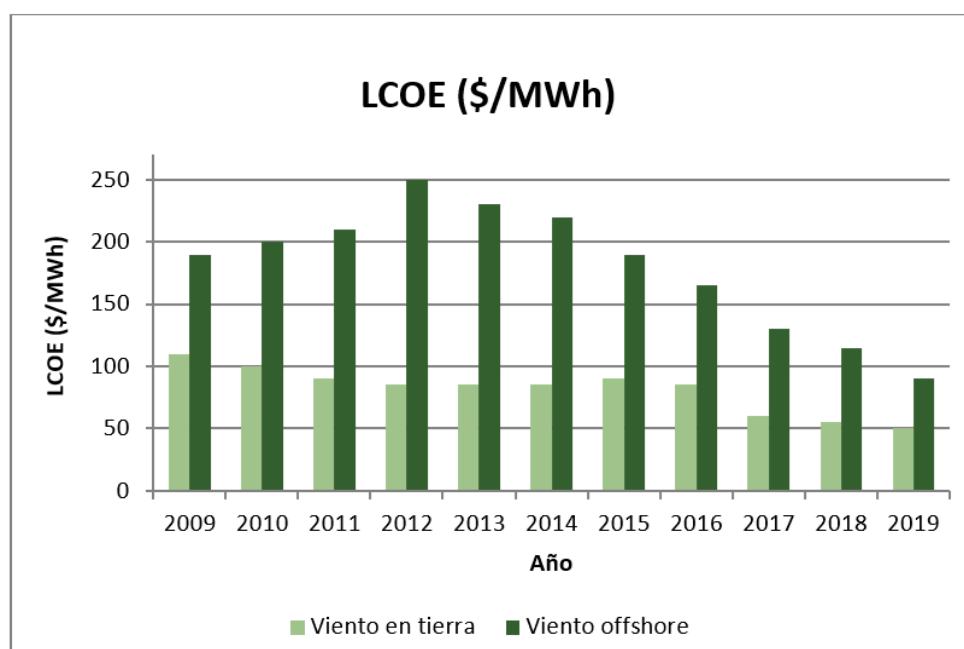


Fig. 2. Comparación de LCOE para viento en tierra y offshore (OWT) entre 2009 y 2019 [8].

Cualquier plan de mantenimiento debe tener como objetivo implementar actividades que proporcionen una confiabilidad óptima del sistema, con un mínimo costo de mantenimiento. En [10] se presenta un modelo probabilístico para estimar los costos de inspección y mantenimiento (I&M) en parques eólicos marinos que utilizan embarcaciones de trabajo. Basado en entrevistas con expertos y literatura científica, el modelo considera la incertidumbre en los costos para optimizar estrategias de mantenimiento. Se realiza un análisis de sensibilidad para identificar los principales factores de costo y se propone un enfoque simplificado para incorporar esta incertidumbre en la optimización de costos de mantenimiento. Las prácticas de mantenimiento en aerogeneradores marinos siguen los principios de la gestión del mantenimiento industrial, sin embargo, estas prácticas se han adaptado a la industria de las OWT y se han agregado herramientas y enfoques novedosos.

C. Mantenimiento de la estructura de la torre

La experiencia adquirida en los parques eólicos terrestres se ha aprovechado en los parques marinos; sin embargo, al estar estas últimas ubicadas en el agua (aguas profundas en el caso de las torres flotantes), las condiciones ambientales del mar hacen que estén sometidas a fuertes vientos y a las fuerzas de las olas, lo que produce cargas y vibraciones no deseadas en estas estructuras. Esto obliga necesariamente a gestionar el mantenimiento de estas estructuras de manera muy particular, principalmente porque en algunas zonas del mundo como China, la industria de la energía eólica marina continuará desarrollándose en áreas oceánicas profundas en los próximos 30 años.

El mantenimiento de estas estructuras se basa en la anticipación de potenciales fallas mediante el monitoreo de variables y así programar anticipadamente el mantenimiento. En [11] se presentan los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) utilizando pruebas no destructivas mediante el empleo de materiales avanzados, así como fusión de datos en redes sensoriales, sistemas automatizados, diferentes mecánicas y gemelos digitales ambientados para la predicción temprana de fallos. La detección temprana de daños de la torre y los cimientos, así como fallas causadas por corrosión, es el foco de atención y monitoreo que se realiza en las estructuras de las torres. Cuando se ha detectado una falla o daño en base a una señal de alarma, un sistema de diagnóstico podría activarse para determinar el grado y la ubicación de la falla potencial.

Recientemente, las redes de sensores inalámbricos inteligentes se han utilizado para un sistema de monitoreo de la salud estructural (SHM) integral de la OWT, que consta de tres módulos para la detección de daños, la validación del modelo y la evaluación, para determinar la existencia, ubicación y severidad del daño estructural de la torre.

D. Mantenimiento oportunista (OM)

El mantenimiento oportunista es una estrategia que se ha venido poniendo en práctica en parques eólicos marinos en dos sentidos:

- Cuando una unidad se detiene por falla de algún sistema o alcanza su estado crítico de degradación, existe la oportunidad de implementar mantenimiento preventivo en los demás sistemas, mientras se realiza la reparación.
- Se aprovechan las ventanas meteorológicas (paradas del generador por recurso de viento no apto para la generación eléctrica), para programar mantenimientos preventivos.

En ambos casos, el desafío está en no elevar injustificadamente los costos por mantenimiento excesivo o no requerido.

Como ventaja de este tipo de mantenimiento, se puede citar que, al combinar las actividades de mantenimiento preventivas y correctivas, se pueden compartir los costos y recursos en general como lo son buques, técnicos y herramientas. Sin embargo, cuando anticipar la fecha de mantenimiento preventivo conduce a reemplazar componentes con vida útil no agotada, no se debe realizar el mantenimiento.

Existen métodos desarrollados que ayudan a tomar decisiones sobre si practicar o no un mantenimiento oportunista, con el objetivo de optimizar costos y la vida útil de los componentes. Los análisis de modos de falla, así como análisis de datos históricos y otras herramientas, son considerados para tomar esas decisiones en esta estrategia de mantenimiento [12].

E. Mantenimiento basado en condición

El mantenimiento basado en la condición (CBM) es un enfoque centrado en la combinación de modelos de confiabilidad basados en datos, con datos recopilados de sensores y monitoreo de condición (CM) para desarrollar mejores estrategias de operación y mantenimiento. Usando los datos producidos por sensores y el conocimiento acumulado con datos históricos, predictivos y proactivos, se puede planificar el mantenimiento [13].

Este es un tipo de mantenimiento utilizado en múltiples sectores desde hace muchos años. Sin embargo, dadas las características particulares, que ya se han citado, de los parques eólicos marinos, resulta estratégico, aplicarlo a estos.

Existen dos actividades muy importantes dentro de este tipo de mantenimiento para que sea efectivo y de lo que se comenta muy poco:

- Priorizar los sistemas para los cuales el monitoreo de condición genera el valor más alto.
- Comprender cuáles son los parámetros que deben ser monitoreados de un sistema específico.

El concepto de riesgo permite priorizar los modos de fallo, evaluando la probabilidad de que ocurran los efectos asociados y las consecuencias de dichos fallos. Las consecuencias de los fallos se pueden clasificar en diversas categorías según los objetivos de la evaluación de riesgos como costo, valor, disponibilidad de activos, o tomando en cuenta la seguridad, salud del personal e impacto ambiental.

El análisis de fallos en sistemas complejos como las turbinas eólicas flotantes se beneficia del uso de enfoques tanto cualitativos como cuantitativos, permitiendo una priorización adecuada de los fallos más críticos. Uno de los métodos más relevantes es el análisis de modos de fallo y efectos (FMEA), que, cuando se combina con modelos de lógica difusa, proporciona una evaluación más precisa de los fallos en entornos inciertos.

A partir de los resultados del análisis FMEA, es posible definir de manera más clara los parámetros específicos que deben ser monitoreados para mitigar los riesgos identificados. En el caso de las turbinas eólicas flotantes, algunos de los parámetros clave que se deben monitorear incluyen: emisiones acústicas para detectar grietas, análisis de humedad para evaluar riesgos de corrosión, y propiedades modales para identificar cambios en la masa o rigidez de la estructura.

La referencia [14] ofrece una descripción detallada sobre cómo priorizar los sistemas y seleccionar los parámetros de monitoreo adecuados, brindando una base sólida para la implementación de sistemas de mantenimiento predictivo y gestión de riesgos en el ámbito de las turbinas eólicas flotantes.

Algunos parámetros típicamente monitoreados en parques eólicos marinos son: emisiones acústicas para identificar posibles grietas, análisis de humedad, para evaluar eventuales riesgos de corrosión, propiedades modales para evaluar posibles cambios en la masa o la rigidez de los componentes estructurales. Herramientas autónomas, han sido y están siendo desarrolladas para el monitoreo de parámetros en parques eólicos marinos, como lo ilustra la Fig. 3.



Fig. 3. Drones de inspección en desarrollo y un vehículo de superficie no tripulado (USV) para operaciones de reconocimiento autónomo [13]

F. Análisis de datos en mantenimiento de parques eólicos marinos

El mantenimiento de parques eólicos marinos requiere una estrategia eficiente que equilibre la frecuencia de las visitas con los costos operativos y la reducción de fallas. Existen diferentes enfoques, desde el mantenimiento correctivo, que reacciona ante fallas ya ocurridas, hasta estrategias proactivas que buscan prevenir averías antes de que se conviertan en problemas graves. La estrategia preventiva, por ejemplo, optimiza los tiempos de mantenimiento basándose en datos de operación y condiciones ambientales, reduciendo así los costos imprevistos y mejorando la fiabilidad de los aerogeneradores.

El uso de tecnologías digitales ha revolucionado el mantenimiento de estas infraestructuras, permitiendo la implementación de metodologías basadas en el análisis de datos. Modelos predictivos y aprendizaje automático (ML) facilitan la detección temprana de fallas, optimizando la planificación del mantenimiento y reduciendo la necesidad de intervenciones inesperadas. Sin embargo, estas técnicas dependen de la calidad y cantidad de datos recopilados, lo que representa un desafío en entornos marinos donde la accesibilidad y fiabilidad del equipo pueden verse afectadas por condiciones adversas.

En este contexto, a través de la integración de datos provenientes de sensores y sistemas de monitoreo, se busca mejorar la toma de decisiones basada en datos. Sin embargo, aún persiste la necesidad de investigar más a fondo la aplicación y adopción de tecnologías avanzadas de análisis de datos, como el análisis predictivo y las herramientas centradas en datos, para maximizar la eficiencia en las actividades de operación y mantenimiento de OWT [15].

Por otra parte, en [16] se detallan modelos novedosos de apoyo a la decisión para la programación del mantenimiento predictivo y preventivo basados en modelos matemáticos y de optimización. Estos modelos, procuran implementar una estrategia óptima de mantenimiento de los sub-ensamblajes de turbinas eólicas para mejorar significativamente la disponibilidad operativa y reducción de costos.

CONCLUSIONES

La red energética de Costa Rica cada vez está más comprometida, por lo que buscar más generación eléctrica parece ser un factor considerable. Ligado a esto la energía eólica se ha convertido en una fuente de energía renovable de gran crecimiento gracias a su aporte positivo con la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, la creación e integración de energía eólica no es sencilla, específicamente hablando de la generación offshore. En este documento se tiene una revisión exhaustiva de información recolectada sobre este tema y muestra importantes temas que se deben conocer y abordar en lo que se refiere a la energía eólica marina en Costa Rica, por lo que de forma puntual se concluye:

- El desarrollo de parques eólicos marinos no dista mucho de los terrestres en términos de análisis y tratamiento del recurso, sin embargo, involucra un mayor reto para adquisición de los datos del sitio, dadas las condiciones de acceso y las áreas de gran tamaño con posible potencial.

- El desarrollo de parques eólicos marinos enfrenta desafíos logísticos y económicos, especialmente en los costos de operación y mantenimiento. Estrategias como el mantenimiento oportunista y el basado en condición, junto con el monitoreo de la salud estructural mediante sistemas SCADA y CMS, son cruciales para anticipar fallas y programar mantenimientos eficientes.
- Las estrategias y técnicas de mantenimiento de los parques eólicos marinos se han basado en las utilizadas para diferentes sectores. Sin embargo, en los parques eólicos marinos, estas han evolucionado adaptándose a sus condiciones particulares con métodos y modelos novedosos que se están desarrollando en busca de lograr una operación rentable y competitiva.
- La experiencia adquirida en parques eólicos terrestres se adapta a las condiciones marinas, enfocándose en la anticipación de fallas y la optimización de los recursos para mejorar el LCOE y la competitividad de la energía eólica marina.

El alcance de este documento es limitado; a pesar de eso, la investigación realizada muestra numerosos estudios sobre los temas de interés que se deben tomar en cuenta al momento de iniciar la implementación de la energía eólica marina. Estas investigaciones son de índole general y no toman en cuenta tipos específicos de aerogeneradores como las turbinas eólicas hidráulicas o las turbinas eólicas de eje vertical, básicamente son tecnologías de turbinas eólicas menos maduras y con pocos ejemplos de instalación.

RECONOCIMIENTO

A las siguientes entidades del Instituto Tecnológico de Costa Rica: Maestría en Administración de la Ingeniería Electromecánica y Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) mediante el proyecto 1341025, por el aporte financiero; al Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE) por el aporte técnico.

REFERENCIAS

- [1] H. P. Javier, "Diseño de un sistema mecánico multiplicador para un aerogenerador que abastece a un parque de vehículos eléctricos", grado de ingeniería mecánica, trabajo de fin de grado, esc. Tec. superior de ing. del diseño, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2020.
- [2] REN21. 2021. Renewables 2021 Global Status Report (París: REN21 Secretariat), pp 33, ISBN 978-3-948393-03-8.
- [3] L. Bernard, "Statistical Review of World Energy, Stat. Rev. of World Energy BP p.l.c.1 St James's Square, London SW1Y 4PD UK, 70th edition, pp. 5-6, 2021.
- [4] D. Alastair, F. Ramón, L. Joyce, "Ruta de la energía eólica marina en Costa Rica", GWEC, Global wind energy council, informe final, Oct., 2021.
- [5] Z. Jiang, "Installation of offshore wind turbines: A technical review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 139, pp. 1-21, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110576>.
- [6] J. R. Rojas Morales y K. Chaves Martínez, "Análisis prospectivo de la cadena de suministro para el desarrollo de energía eólica marina en Costa Rica", RC, vol. 24, n.º 1, pp. 57-78, jun. 2021. <https://doi.org/10.22458/rc.v24i1.3495>.
- [7] V. Spielmann, J. Dannheim, T. Brey, and J. W. Coolen, "Decommissioning of offshore wind farms and its impact on benthic ecology," Journal of Environmental Management, vol. 347, p. 119022, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119022>.
- [8] Z. Ren, A. S. Verma, Y. Li, J. E. Teuwen, Z. Jiang, "Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 144, Jul. 2021, pp. 1-22.
- [9] A. M. Costa, J. A. Orosa, D. Vergara, F. A. Pablo, "New Tendencies in Wind Energy Operation and Maintenance", Applied sciences, Vol. 11, 2021, pp. 1-26.
- [10] M. Farhan, R. Schneider, S. Thöns, M. Gündel, "Probabilistic cost modeling as a basis for optimizing inspection and maintenance of turbine support structures in offshore wind farms". Wind Energy Science, 10(2), 2025, 461-481.

- [11] K. Kong, K. Dyer, C. Payne, I. Hamerton, P.M. Weaver, "Progress and Trends in Damage Detection Methods, Maintenance, and Data-driven Monitoring of Wind Turbine Blades – A Review", *Renewable Energy Focus*, Vol. 44, Mar. 2023, pp. 390-412.
- [12] J. Kang, C. G. Soares, "An opportunistic maintenance policy for offshore wind farms", *Ocean Engineering*, Vol. 216, Nov. 2020, pp. 1-9.
- [13] R. Giovanni, P. R. Thies, L. Johanning, "Current Status and Future Trends in the Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbines: A Review", *Energies*, Vol. 14, Ap. 2021, pp. 1-28.
- [14] Q. D. Feng, J. S. Xia, L. Wen, M. Yazdi, "Failure analysis of floating offshore wind turbines based on a fuzzy failure mode and effect analysis model", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 40, Mar. 2024, pp. 2159-2177.
- [15] Y. Hadjoudj, R. Pandit, "A review on data-centric decision tools for offshore wind operation and maintenance activities: Challenges and opportunities." *Energy Science & Engineering*, Vol 11, Apr. 2023, pp. 1501-1515.
- [16] M. El-Naggar, A. Sayed, M. Elshahed, & M. El-Shimy, "Optimal maintenance strategy of wind turbine subassemblies to improve the overall availability." *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 14, Oct. 2023, 102177.