

Diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético

Alida Ramirez-Jimenez ¹, José Rafael Dorrego-Portela ² y Quetzalcoatl Hernandez-Escobedo ^{3,*}

¹ Escuela Internacional de Doctorado, Universidad de Almería, Almería, Andalucía, España.

² Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Tehuantepec, Oaxaca, México.

³ Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia: ghernandez@unam.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de marzo de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 2 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.401>

Resumen: El diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético representa una evolución en la generación de energía renovable, combinando la producción eólica con sistemas de almacenamiento para optimizar la eficiencia y la estabilidad del suministro eléctrico. Estos parques integran aerogeneradores con tecnologías de almacenamiento, como baterías (litio-ion, flujo redox) o sistemas de almacenamiento térmico, permitiendo almacenar el exceso de energía generada durante períodos de alta producción y liberarla en momentos de baja generación o alta demanda. Esto reduce la intermitencia típica de la energía eólica, mejorando la integración en la red eléctrica y maximizando el aprovechamiento de los recursos renovables. El diseño de estos sistemas requiere un enfoque multidisciplinario, considerando factores como la ubicación geográfica, la capacidad de generación eólica, la demanda energética local y las características del sistema de almacenamiento. Además, se optimiza la gestión energética mediante algoritmos avanzados que predicen la producción eólica y la demanda, ajustando la carga y descarga del almacenamiento para maximizar la rentabilidad y minimizar el impacto ambiental. Estos parques híbridos son clave en la transición energética, ya que incrementan la flexibilidad y confiabilidad de las redes, reducen la dependencia de combustibles fósiles y contribuyen a la descarbonización del sector energético.

Palabras clave: Parques eólicos; energías renovables; almacenamiento de energía.

Introducción

La transición hacia un sistema energético sostenible y descarbonizado es uno de los mayores desafíos globales del siglo XXI. En este contexto, las energías renovables, como la eólica, han emergido como pilares fundamentales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. Sin embargo, la naturaleza intermitente y variable de la energía eólica plantea desafíos significativos para su integración en las redes eléctricas, especialmente en términos de estabilidad y confiabilidad del suministro (IRENA – International Renewable Energy Agency, 2025). Para abordar estos desafíos, el diseño de parques eólicos híbridos con sistemas de almacenamiento energético ha ganado relevancia, ya que combina la generación de energía eólica con tecnologías de almacenamiento que permiten gestionar de manera más eficiente los excedentes energéticos y garantizar un suministro continuo.

Los parques eólicos híbridos no solo maximizan la utilización de los recursos renovables, sino también mejoran la flexibilidad de la red, reducen los costos operativos y disminuyen la dependencia de combustibles fósiles para equilibrar la demanda energética (GWEC, 2025). Además, estos sistemas son particularmente útiles en regiones con alta penetración de energías renovables, donde la variabilidad de la generación puede afectar la estabilidad de la red. Este trabajo tiene como objetivo explorar el estado del arte en el diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético, analizando las tecnologías más avanzadas, los desafíos técnicos y económicos, y las tendencias futuras en este campo.

Tecnologías de Generación Eólica y su Integración con Almacenamiento

La energía eólica ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, convirtiéndose en una de las fuentes de energía renovable más importantes a nivel global. Según el Global Wind Energy Council (GWEC, 2025), la capacidad instalada de energía eólica superó los 900 GW en 2023, con proyecciones de alcanzar los 1.500 GW para 2030. Sin embargo, la integración de grandes cantidades de energía eólica en la red eléctrica presenta desafíos técnicos, como la variabilidad en la generación y la dificultad para predecir con precisión los recursos eólicos (IRENA – International Renewable Energy Agency, 2025).

Para abordar estos desafíos, los parques eólicos híbridos han surgido como una solución innovadora. Estos sistemas combinan la generación eólica con tecnologías de almacenamiento energético, como baterías electroquímicas, sistemas de almacenamiento térmico o hidrógeno verde, permitiendo una gestión más eficiente de la energía generada (AL Jarrah & AL Dwairi, 2024). Por ejemplo, las baterías de litio-ion, debido a su alta densidad energética y eficiencia, son una de las tecnologías de almacenamiento más utilizadas en combinación con parques eólicos (Ayyildiz & Erdogan, 2024).

Diseño y optimización de parques eólicos híbridos

El diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético requiere un enfoque multidisciplinario que considere aspectos técnicos, económicos y ambientales. Uno de los principales desafíos es la optimización del tamaño y la capacidad de los sistemas de almacenamiento en relación con la capacidad de generación eólica. Un sistema de almacenamiento sobredimensionado puede aumentar los costos del proyecto, mientras que uno subdimensionado puede limitar la capacidad de gestionar la variabilidad de la generación eólica (de Moura Ribeiro *et al.*, 2024).

Para abordar este desafío, se han desarrollado modelos de optimización que utilizan algoritmos avanzados para determinar la configuración óptima de los sistemas híbridos. Estos modelos consideran factores como la variabilidad del recurso eólico, los patrones de demanda energética, los costos de inversión y operación, y las políticas regulatorias (Dhoot *et al.*, 2021). Por ejemplo, estudios recientes han utilizado técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático, para predecir la generación eólica y optimizar la gestión del almacenamiento energético (Drapalik *et al.*, 2024).

Desarrollo

El estudio se desarrolla en Juchitán, en el Istmo de Tehuantepec Oaxaca México. En la Figura 1 se observa el sitio estudiado. El diseño y análisis de parques eólicos híbridos con sistemas de almacenamiento energético requieren un enfoque sistemático que combine la evaluación de recursos, la selección de tecnologías, la modelización de sistemas y la optimización de la gestión energética. A continuación, se describe la metodología empleada en este estudio, que incluye la recopilación de datos, el diseño del sistema híbrido, la simulación de escenarios y la evaluación de resultados.

Sitio estudiado

El estudio se realiza en una zona altamente ventosa como se muestra en la Figura 1. El primer paso en el diseño de un parque eólico híbrido es la evaluación del recurso eólico en la ubicación seleccionada. Para ello, se utilizaron datos históricos de rapidez y dirección del viento, obtenidos de bases de datos globales, como MERRA 2. Estos datos se procesaron utilizando el software especializado WAsP, para generar modelos de microescala del recurso eólico y estimar la energía anual generable en el sitio (Esnaola *et al.*, 2024).

Además, se analizaron los patrones de demanda energética de la región, utilizando datos de operadores del Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE) (Centro Nacional de Control de Energía | Gobierno | gob.mx, s. f.).



Figura 1. Sitio estudiado.

Esto permitió identificar los períodos de alta y baja demanda, así como las fluctuaciones estacionales, que son críticos para dimensionar el sistema de almacenamiento, (ver Figura 2).

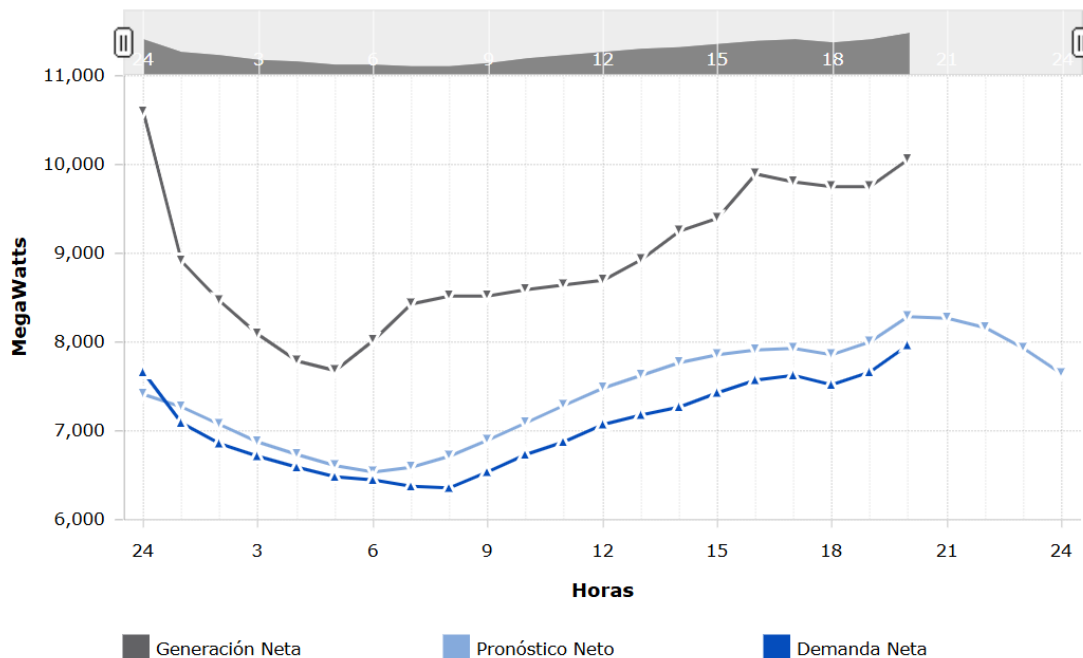


Figura 2. Demanda de la región.

Como se observar en la Figura 2, la demanda en la región occidental presenta su incremento a partir de las 15:00 h teniendo su pico a las 24:00 h.

Tecnologías de generación y almacenamiento

En función de las características del recurso eólico y la demanda energética, se seleccionaron las tecnologías de generación y almacenamiento más adecuadas. Para la generación eólica, se consideraron aerogeneradores de última generación con capacidades que oscilan entre 1 MW y 2 MW, dependiendo de las condiciones del sitio. Estos aerogeneradores fueron seleccionados utilizando la distribución de Weibull y el coeficiente de potencia del aerogenerador, así se garantiza la selección adecuada del aerogenerador (Fatahian *et al.*, 2024). En cuanto al almacenamiento energético, se evaluaron varias tecnologías las Baterías de litio-ion (Li-ion), baterías de flujo redox, y almacenamiento de hidrógeno.

Baterías de litio-ion

Las baterías de litio-ion (Li-ion) las cuales se han convertido en una de las tecnologías de almacenamiento de energía más utilizadas en aplicaciones que van desde dispositivos electrónicos portátiles hasta sistemas de almacenamiento a gran escala para redes eléctricas. Su popularidad se debe a su alta densidad energética, eficiencia y capacidad para soportar múltiples ciclos de carga y descarga. A continuación, se describe en detalle esta tecnología, incluyendo su funcionamiento, ventajas, desafíos y aplicaciones en el contexto de parques eólicos híbridos (He, *et al.*, 2024).

Las baterías de litio-ion almacenan energía mediante reacciones electroquímicas que involucran el movimiento de iones de litio entre dos electrodos: un ánodo (generalmente hecho de grafito) y un cátodo (compuesto por óxidos de litio, como LiCoO_2 , LiFePO_4 o LiNiMnCoO_2). Estos electrodos están separados por un electrolito, que es una solución conductora de iones, pero no de electrones. Durante la carga, los iones de litio se mueven del cátodo al ánodo, almacenando energía. Durante la descarga, los iones regresan al cátodo, liberando energía en forma de electricidad (He *et al.*, 2022). La reacción general en una batería de litio-ion se expresan con las ecuaciones (1) y (2).



Los componentes principales son el ánodo que generalmente está compuesto por grafito, tiene una estructura laminar que permite la intercalación de iones de litio; Cátodo el cual puede estar hecho de diversos materiales, como óxidos de litio ($LiCoO_2$, $LiFePO_4$, $LiNiMnCoO_2$), que determinan la capacidad, voltaje y seguridad de la batería; Electrolito es una solución líquida o sólida que permite el movimiento de iones de litio entre los electrodos. Los electrolitos líquidos suelen ser sales de litio disueltas en solventes orgánicos, mientras que los electrolitos sólidos son materiales cerámicos o poliméricos; el separador es una membrana porosa que evita el contacto directo entre el ánodo y el cátodo, permitiendo solo el paso de iones; y la carcasa es la que protege los componentes internos y puede ser rígida (para baterías prismáticas o cilíndricas) o flexible (para baterías de bolsa).

En el contexto de parques eólicos híbridos, las baterías de litio-ion desempeñan un papel crucial en la gestión de la energía generada. Ya que estabilizan la red eléctrica al almacenar el exceso de energía generada durante períodos de alta producción eólica y la liberan durante períodos de baja generación o alta demanda, ayudando a equilibrar la red. Estas baterías permiten almacenar energía cuando los precios de la electricidad son bajos y venderla cuando los precios son altos, maximizando los ingresos del parque eólico. Pueden combinarse con sistemas de almacenamiento de hidrógeno o térmico para proporcionar soluciones de almacenamiento a corto y largo plazo (Hu *et al.*, 2023).

Baterías de flujo redox

Las baterías de flujo redox (Redox Flow Batteries, RFB) son una tecnología de almacenamiento de energía electroquímica que se distingue por su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía de manera escalable y flexible. A diferencia de las baterías convencionales, donde la energía se almacena en electrodos sólidos, las baterías de flujo redox almacenan energía en soluciones líquidas de electrolitos, lo que permite una separación entre la capacidad de almacenamiento (determinada por el volumen de los tanques de electrolito) y la potencia (determinada por el tamaño de la celda electroquímica). Esta característica las hace especialmente adecuadas para aplicaciones de almacenamiento a gran escala, como la integración con parques eólicos híbridos (Jargalsalkhan *et al.*, 2023).

Durante la carga, la energía eléctrica se convierte en energía química mediante la oxidación y reducción de las especies redox en los electrolitos. Durante la descarga, el proceso se invierte, liberando energía eléctrica. Las reacciones generales en una batería de flujo redox utilizando un ejemplo común basado en vanadio pueden resumirse de la siguiente manera. En una batería de flujo redox de vanadio, ambos electrolitos contienen vanadio en diferentes estados de oxidación. Las reacciones son las siguientes:

Tabla 1. Reacciones de baterías de flujo redox de vanadio.

Durante la descarga (liberación de energía)		
En el ánodo (electrolito negativo)	$V^{2+} \rightarrow V^{3+} + e^{-}$	El vanadio en estado de oxidación +2 (V^{2+}) se oxida a vanadio en estado +3 (V^{3+}), liberando un electrón.
En el cátodo (electrolito positivo)	$VO_2^{+} + 2H^{+} + e^{-} \rightarrow VO^{2+} + H_2O$	El ion vanadilo (VO_2^{+}) en estado +5 se reduce a vanadio en estado +4 (VO^{2+}), aceptando un electrón.
Durante la carga (almacenamiento de energía)		
En el ánodo (electrolito negativo)	$V^{3+} + e^{-} \rightarrow V^{2+}$	El vanadio en estado +3 (V^{3+}) se reduce a vanadio en estado +2 (V^{2+}), aceptando un electrón.
En el cátodo (electrolito positivo)	$VO^{2+} + H_2O \rightarrow VO_2^{+} + 2H^{+} + e^{-}$	El vanadio en estado +4 (VO^{2+}) se oxida a vanadilo (VO_2^{+}) en estado +5, liberando un electrón.

Aunque el vanadio es el sistema más común, existen otros pares redox utilizados en baterías de flujo. En la Tabla 2 se describen algunos casos.

Tabla 2. Pares redox.

Batería de hierro-cromo (Fe/Cr)	
Ánodo (Cr)	$Cr^{2+} \rightarrow Cr^{3+} + e^{-}$
Cátodo (Fe)	$Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$
Batería de bromuro de zinc (Zn/Br ₂)	
Ánodo (Zn)	$Zn + Zn^{2+} \rightarrow 2e^{-}$
Cátodo (Br ₂)	$Br_2 + 2e^{-} \rightarrow 2Br^{-}$
Batería de hierro-azufre (Fe/S)	
Ánodo (Fe)	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^{-}$
Cátodo (S)	$S + 2e^{-} \rightarrow S^{2-}$

Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento de hidrógeno y la energía eólica son dos pilares fundamentales en la transición hacia un sistema energético más sostenible y descarbonizado. La energía eólica, una de las fuentes de energía renovable más utilizadas, tiene el potencial de generar electricidad de manera limpia y eficiente. Sin embargo, su naturaleza intermitente requiere soluciones de almacenamiento que permitan equilibrar la oferta y la demanda de energía. El hidrógeno, especialmente el hidrógeno verde producido mediante electrólisis utilizando energía renovable, emerge como una solución prometedora para almacenar y transportar energía a largo plazo.

La energía eólica se obtiene a través de aerogeneradores que convierten la energía cinética del viento en electricidad. Este proceso es limpio, ya que no emite gases de efecto invernadero durante la generación de energía. Sin embargo, la disponibilidad de viento no es constante, lo que genera fluctuaciones en la producción de electricidad. Estas variaciones pueden dificultar la integración de la energía eólica en la red eléctrica, especialmente en momentos de baja demanda o exceso de generación. Para maximizar el aprovechamiento de esta energía, es esencial contar con sistemas de almacenamiento que permitan guardar el excedente y liberarlo cuando sea necesario.

El hidrógeno, particularmente el hidrógeno verde, se produce mediante la electrólisis del agua, un proceso que utiliza electricidad renovable para separar el hidrógeno y el oxígeno. Este hidrógeno puede almacenarse en tanques a alta presión, en forma líquida a bajas temperaturas, o en materiales sólidos como hidruros metálicos. Una de las ventajas clave del hidrógeno es su alta densidad energética, lo que lo convierte en un medio eficaz para almacenar grandes cantidades de energía durante períodos prolongados. Además, el hidrógeno puede ser transportado y utilizado en diversos sectores, como la industria, el transporte y la generación de electricidad, mediante celdas de combustible o combustión directa (Kim *et al.*, 2024).

La combinación de energía eólica y almacenamiento de hidrógeno ofrece una solución sinérgica para abordar los desafíos de la intermitencia de las energías renovables. Durante períodos de alta generación eólica, el excedente de electricidad puede utilizarse para producir hidrógeno mediante electrólisis. Este hidrógeno almacenado puede luego convertirse nuevamente en electricidad cuando la demanda supere la generación eólica, o utilizarse directamente en aplicaciones industriales o de transporte. Este enfoque no solo mejora la flexibilidad del sistema energético, sino que también contribuye a la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado y la industria química (Pelser *et al.*, 2023).

El almacenamiento de hidrógeno puede realizarse mediante diferentes métodos, cada uno de los cuales involucra reacciones químicas específicas. En la Tabla 3 se describen las reacciones químicas asociadas con los principales métodos de almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 3. Reacciones químicas asociadas al almacenamiento de hidrógeno.

Tipo	Reacciones químicas	Proceso
Almacenamiento de Hidrógeno en Forma de Gas (Comprimido)		Este método no implica una reacción química, sino un proceso físico en el que el hidrógeno gaseoso (H_2) se comprime a altas presiones (generalmente entre 350 y 700 bar) para reducir su volumen y facilitar su almacenamiento y transporte (Hannan <i>et al.</i> , 2022).
Almacenamiento de Hidrógeno en Forma Líquida (Criogénica)	$H_2(gas) \xrightarrow{-235\text{ }^{\circ}C} H_2(líquido)$	El hidrógeno se licúa a temperaturas extremadamente bajas (-253 °C o 20 K) para reducir su volumen. Este proceso tampoco implica una reacción química, sino un cambio de fase físico (Zohuri & Zohuri, 2019).
Almacenamiento de Hidrógeno en Hidruros Metálicos	$Mg + H_2 \rightarrow MgH_2$ Absorción de hidrógeno (hidrogenación) $MgH_2 \rightarrow Mg + H_2$ Liberación de hidrógeno (deshidrogenación)	Los hidruros metálicos son compuestos formados por metales que pueden absorber y liberar hidrógeno mediante reacciones químicas reversibles. Un ejemplo común es el hidruro de magnesio (MgH_2) (Bellon Monsalve, 2017).
Almacenamiento de Hidrógeno en Líquidos Orgánicos Portadores de Hidrógeno (LOHC)	$C_7H_8(tolueno) + 3H_2 \rightarrow C_7H_{14}(metilciclohexano)$ Hidrogenación (almacenamiento) $C_7H_{14}(metilciclohexano) \rightarrow C_7H_8(tolueno) + 3H_2$ Deshidrogenación (liberación)	Los LOHC son compuestos orgánicos que pueden unirse químicamente al hidrógeno y liberarlo mediante reacciones reversibles (Gutierrez De La Llave, 2023).
Almacenamiento de Hidrógeno en Amoníaco (NH_3)	$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$ Síntesis de amoníaco (almacenamiento) $2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$ Descomposición de amoníaco (liberación)	El amoníaco es un compuesto químico que puede almacenar hidrógeno y liberarlo mediante reacciones químicas (Blázquez Calderón, 2024).
Almacenamiento de Hidrógeno en Forma de Agua (Electrólisis y Combustión)	$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ Electrólisis del agua (producción de hidrógeno) $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ Combustión de hidrógeno (liberación de energía)	El hidrógeno puede almacenarse indirectamente en forma de agua (H_2O) y liberarse mediante electrólisis o combustión (Casio Herrera & Huayna Huaman, 2024).
Almacenamiento de Hidrógeno en Compuestos Químicos (Hidruros Complejos)	$NaBH_4 + 2H_2O \rightarrow NaBO_2 + 4H_2$ Hidrólisis de borohidruro de sodio (liberación de hidrógeno)	Algunos compuestos químicos, como los borohidruros (por ejemplo, $NaBH_4$), pueden almacenar hidrógeno y liberarlo mediante reacciones químicas (Hernández Fernández, 2023).

Resultados

El modelado del recurso eólico es crucial para el emplazamiento de aerogeneradores, para un correcto análisis se utiliza un mapa vectorial de la orografía del sitio, el factor de rugosidad, y la meteorología, en la Figura 3 se presenta el mapa vectorial del sitio. Las variables meteorológicas de Juchitán, como la temperatura es en promedio de 26.5 °C, la velocidad del viento 5.9 m/s, o la radiación solar global de 5.3 kWh/m²/día. En la Figura 4 se presenta el modelo de microescala del recurso eólico.

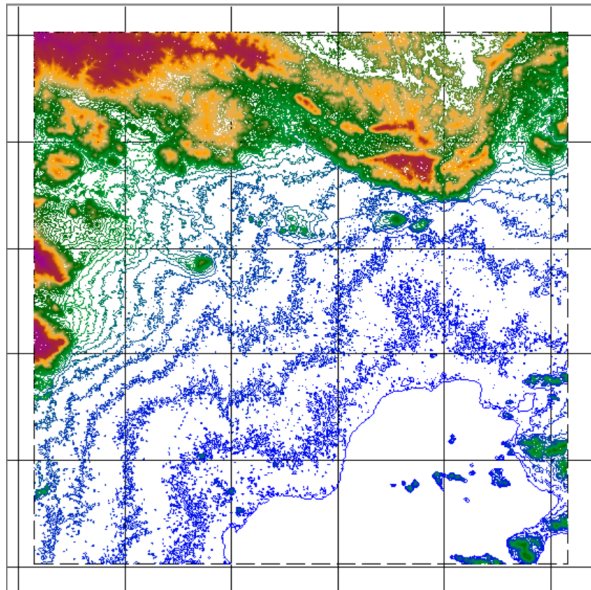


Figura 3. Mapa de orografía.

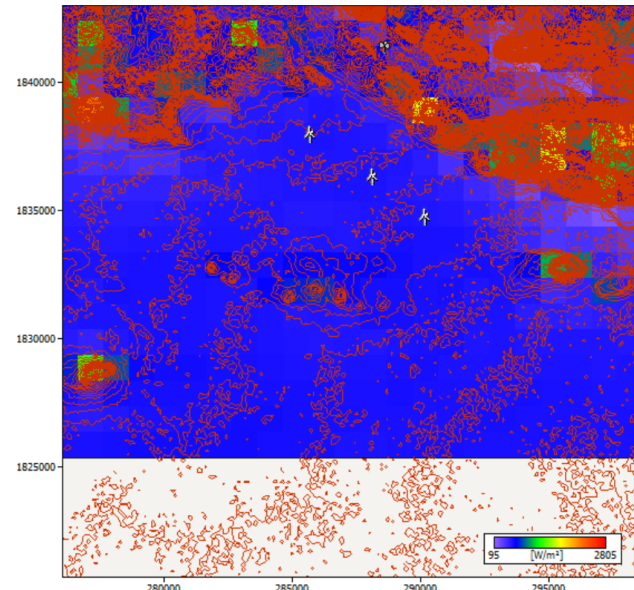


Figura 4. Emplazamiento eólico.

En la Figura 5 se presenta la relación entre la radiación solar global y la velocidad del viento.

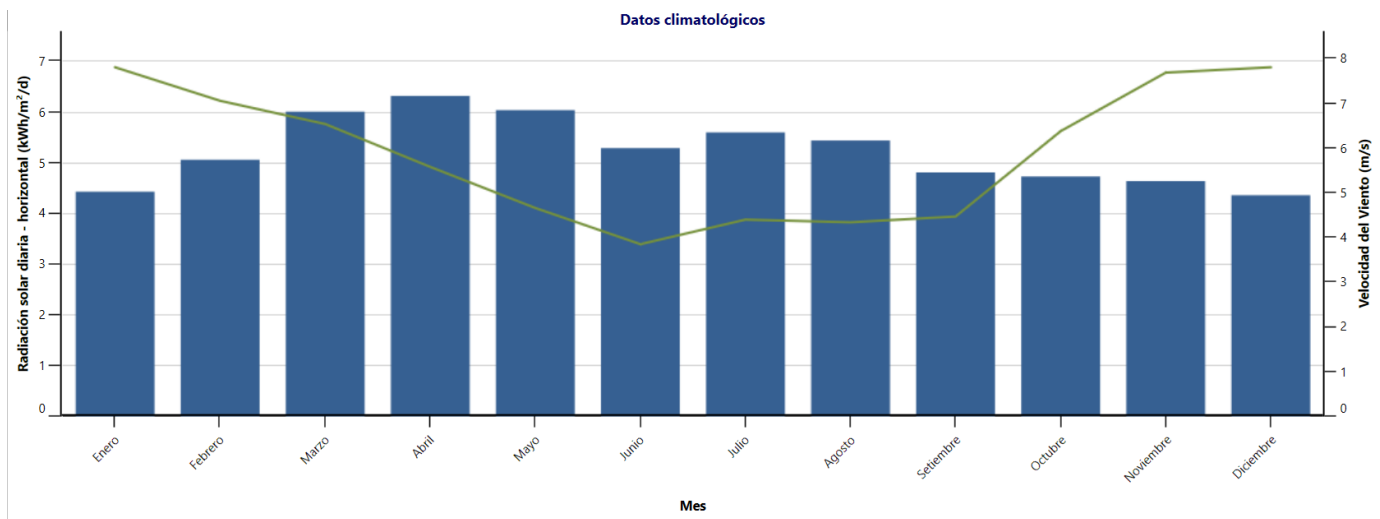


Figura 5. Relación entre variables meteorológicas.

Como se muestra en la Figura 5 en un análisis de un año promedio, la radiación solar global (kWh/m²/día) a lo largo del año presenta una mayor cantidad los meses de mayo a septiembre, mientras que la mayor velocidad del viento (m/s) se presenta en los meses de octubre a marzo, lo que hace un lugar correcto para instalación de sistemas híbridos solar-eólicos.

Conclusiones

El diseño de parques eólicos implica tomar en cuenta varios aspectos, como la orografía y la rugosidad, también las condiciones meteorológicas influyen en una correcta evaluación del recurso eólico. En este trabajo se mostró que en los parques eólicos es posible instalar paneles fotovoltaicos, en especial en el caso de Juchitán Oaxaca, la mayor radiación solar se presenta en los meses donde la temporada ventosa tiene los vientos más bajos, esto podría ayudar a disminuir la intermitencia en la generación de energía eléctrica.

El almacenamiento energético propuesto contempla tres métodos, se necesita realizar un análisis de viabilidad técnico-económica para determinar cuál método es el óptimo. Para trabajos futuros se pretende analizar los sitios con mayor potencial eólico y solar para determinar la viabilidad de sistemas híbridos, también se podrían evaluar otros tipos de recurso renovable.

Bibliografía

- AL Jarrah, A. M., & AL Dwairi, R. A. (2024). Jordan wind energy potential and suggested areas for large-scale wind turbines investment. *Energy for Sustainable Development*, 80, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101452>
- Ayyildiz, E., & Erdogan, M. (2024). A comprehensive approach to evaluate risk mitigation strategies in offshore wind farms using spherical fuzzy decision making analysis. *Ocean Engineering*, 311, 118881. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118881>
- Bellon Monsalve, D. (2017). *Almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos: Síntesis y caracterización*.
- Blázquez Calderón, A. (2024). *Análisis techno-económico del uso de amoníaco como vector en el transporte y almacenamiento de hidrógeno*.
- Casío Herrera, D. H., & Huayna Huaman, J. G. (2024). Implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto.
- Centro Nacional de Control de Energía | Gobierno | gob.mx. (s. f.). Recuperado 20 de marzo de 2022, de <https://www.gob.mx/cenace>
- de Moura Ribeiro, A., Hallak, P. H., de Castro Lemonge, A. C., & dos Santos Loureiro, F. (2024). Automatic grouping of wind turbine types via multi-objective formulation for nonuniform wind farm layout optimization using an analytical wake model. *Energy Conversion and Management*, 315, 118759. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118759>
- Dhoot, A., Antonini, E. G. A., Romero, D. A., & Amon, C. H. (2021). Optimizing wind farms layouts for maximum energy production using probabilistic inference: Benchmarking reveals superior computational efficiency and scalability. *Energy*, 223, 120035. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120035>
- Drapalik, M., Vavrik, V., & Liebert, W. (2024). The effect of wind turbines with low rotor power density on power fluctuations. *Next Energy*, 5, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100156>
- Esnaola, G., Ulazia, A., Sáenz, J., & Ibarra-Berastegi, G. (2024). Future changes of global Annual and Seasonal Wind-Energy Production in CMIP6 projections considering air density variation. *Energy*, 307, 132706. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132706>
- Fatahian, E., Mishra, R., Jackson, F. F., & Fatahian, H. (2024). Optimization and analysis of self-starting capabilities of vertical axis wind turbine pairs: A CFD-Taguchi approach. *Ocean Engineering*, 302, 117614. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117614>
- Gutierrez De La Llave, N. (2023). *Almacenamiento de hidrógeno en líquidos orgánicos*.
- GWEC. (2025, marzo 26). <https://www.gwec.net>
- Hannan, M. A., Abu, S. M., Al-Shetwi, A. Q., Mansor, M., Ansari, M. N. M., Muttaqi, K. M., & Dong, Z. Y. (2022). Hydrogen energy storage integrated battery and supercapacitor based hybrid power system: A statistical analysis towards future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(93), 39523-39548. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.099>
- He, R., Yang, H., Lu, L., & Gao, X. (2024). Site-specific wake steering strategy for combined power enhancement and fatigue mitigation within wind farms. *Renewable Energy*, 225, 120324. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120324>
- He, R., Yang, H., Sun, S., Lu, L., Sun, H., & Gao, X. (2022). A machine learning-based fatigue loads and power prediction method for wind turbines under yaw control. *Applied Energy*, 326, 120013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120013>
- Hernández Fernández, A. (2023). *Hidrógeno verde y su almacenamiento energético: Estado del arte*.
- Hu, Z., Gao, B., & Mao, Y. (2023). Nonlinear model predictive control-based active power dispatch strategy for wind power plant considering dynamic wake effect. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108996. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.108996>
- IRENA – International Renewable Energy Agency. (2025, marzo 26). <https://www.irena.org/>
- Jargalsaikhan, N., Ueda, S., Masahiro, F., Matayoshi, H., Mikhaylov, A., Byambaa, S., & Senjyu, T. (2024). Exploring influence of air density deviation on power production of wind energy conversion system: Study on correction method. *Renewable Energy*, 220, 119636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119636>
- Kim, J., Shin, H.-J., Lee, K., & Hong, J. (2024). Enhancement of ANN-based wind power forecasting by modification of surface roughness parameterization over complex terrain. *Journal of Environmental Management*, 362, 121246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121246>
- Pelser, T., Weinand, J. M., Kuckertz, P., McKenna, R., Linssen, J., & Stolten, D. (2024). Reviewing accuracy & reproducibility of large-scale wind resource assessments. *Advances in Applied Energy*, 13, 100158. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100158>
- Zohuri, B., & Zohuri, B. (2019). Cryogenics and liquid hydrogen storage. *Hydrogen energy: challenges and solutions for a cleaner future*, 121-139.