

Recepción: 12.11.2025

Revisión: 28.12.25

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0003-9934-1103>

<https://orcid.org/0009-0008-7506-4419>

GENERADOR EÓLICO: CUANDO EL VIENTO SE VOLVIÓ ELECTRICIDAD

WIND TURBINE: WHEN WIND TRANSFORMS ELECTRICITY

José Carlos Zepeda Medina^{1,2}

Adriana Hernández Teniza²

¹Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, UPAEP, 21 Sur 1103,
Barrio de Santiago, C.P. 72410, Puebla, Puebla, México

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Instituto de Ciencias,
Posgrado en Dispositivos Semiconductores, Av. San Claudio y 14 Sur, Edif.
IC 5 C. U. Col. San Manuel, Puebla 72520, México

Correos:

josecarlos.zepeda@upaep.mx*

adriana.hernandezteni@alumno.buap.mx

Resumen

La contaminación ambiental constituye un problema persistente y de gran relevancia, derivado de las diversas actividades económicas e industriales, entre ellas la generación de electricidad, cuya producción depende en gran medida del uso de combustibles fósiles. En respuesta a esta problemática, se han desarrollado e implementado alternativas orientadas a mitigar el impacto ambiental, promoviendo el uso de tecnologías basadas en fuentes de energía renovable. Estas tecnologías buscan ser sostenibles, eficientes, ampliamente disponibles en la naturaleza y, fundamentalmente, no tóxicas para el entorno. En este contexto, los generadores eólicos representan una opción viable y prometedora, al aprovechar una fuente inagotable de energía: el viento. Cada uno de los componentes que integran estos sistemas está diseñado para optimizar la conversión de la energía cinética del aire en energía eléctrica, alcanzando potencias que varían de aproximadamente 100 W a 12 MW, según el tamaño del generador y las condiciones ambientales de operación, lo que lo convierte en una gran opción de tecnología sostenible y sustentable para el mundo.

Palabras clave: Generador eólico, electricidad, aerogenerador, generador eléctrico, energías renovables.

Abstract

Environmental pollution is a persistent and significant problem resulting from various economic and industrial activities, including electricity generation, which largely relies on fossil fuels. In response to this issue, alternatives have been developed and implemented to mitigate environmental impact, promoting the use of technologies based on renewable energy sources. These technologies aspire to be sustainable, efficient, abundant in nature, and fundamentally non-toxic to the environment. In this context, wind generators are a viable and promising option, as they enable the use of an inexhaustible energy source: wind. Each component of these systems is designed to optimize the conversion of air's kinetic energy into electrical energy, with power ratings ranging from approximately 100 W to 12 MW, depending on generator size and operating conditions. This makes it a strong option for sustainable technologies worldwide.

Keywords: Wind generator, electricity, wind turbine, electric generator, renewable energy.

Introducción

La humanidad, desde sus inicios, ha aprovechado la naturaleza para desarrollar herramientas que le permitan mejorar sus condiciones de vida. Un ejemplo de esto ha sido el aprovechamiento de la fuerza invisible del viento para obtener energía, desde antiguos molinos de viento hasta sofisticados aerogeneradores. Actualmente, cuando la humanidad busca una transición energética, el viento puede convertirse en uno de los aliados más importantes para frenar el cambio climático y reducir cada vez más el uso del combustible fósil para generar energía.

En este artículo se explorará brevemente la tecnología capaz de aprovechar la fuerza del viento para generar electricidad: el generador eólico.

Explicando que es esta tecnología, los tipos de generadores eólicos que existen, así como el panorama de esta tecnología en México y en el mundo. Además, ejemplificar algunas aplica-

ciones innovadoras en el desarrollo y el futuro de esta tecnología.

¿Qué es y cómo funciona un generador eólico?

Un generador eólico (aerogenerador) es el sistema o dispositivo que transforma la energía del viento en energía eléctrica. Un aerogenerador funciona de la siguiente manera: el aire que circula a través del interior hace girar las palas del aerogenerador. Estas palas o hélices están unidas a un rotor. El movimiento de rotación del rotor se convierte en energía eléctrica mediante un generador eléctrico.

Un aerogenerador es un dispositivo tecnológico muy complejo; sin embargo, podemos resumir sus componentes en 4 partes principales (palas, rotor, generador eléctrico y control), los cuales se describen a continuación:

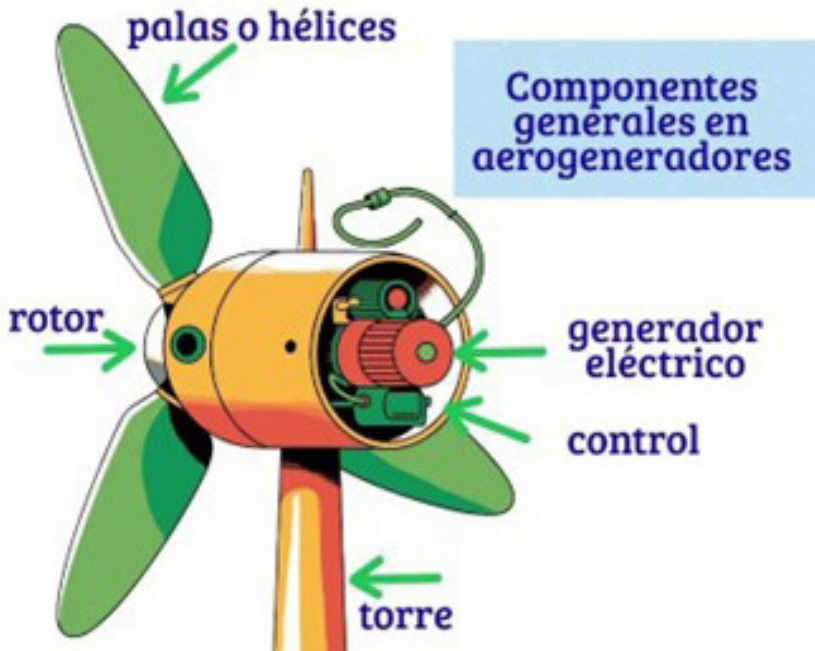


Figura No. 1. Componentes principales de un generador eólico. Imagen realizada usando IA.

- Palas o hélices: su función es “atrapar” el aire; esto es posible debido a la forma o geometría de estas palas, haciendo que el aire las empuje, generando un movimiento rotatorio.
- Rotor/eje: su función es transmitir el movimiento rotatorio generado por las palas al generador eléctrico. Las palas y el rotor, en esencia, son un rehilete.
- Generador eléctrico: convierte el movimiento transmitido en corriente eléctrica, aprovechando generalmente el campo magnético de los imanes presentes en este componente, los cuales, a través de la inducción electromagnética, producen corriente eléctrica (Romero, 2019; Tipler, 2008).
- Control: es un sistema electrónico que evita que el rotor se salga de control.

Según la orientación de su eje:

1. Eje horizontal: dentro del mundo de los generadores eólicos, este tipo es el más común en parques eólicos (extensión de varios kilómetros que alberga decenas de aerogeneradores); generalmente está compuesto por tres palas o hélices. Sin embargo, dentro de esta categoría también tenemos subcategorías (Sanz, 2022):

- Multipala: son aerogeneradores con más de 3 palas o hélices; visualmente, son muy similares a los molinos de agua. Estos se usan principalmente en tareas de aplicación rural, como el bombeo de agua de pozos.
- De velocidad fija: estos aerogeneradores están diseñados para que siempre roten a la misma velocidad; sin embargo, su eficiencia puede ser menor.
- De velocidad variable: estos aerogeneradores están diseñados para que su velocidad de rotación esté en función de la velocidad del viento, es decir, a mayor viento, más rendimiento.

Tipos de generadores eólicos

Podemos clasificar los aerogeneradores en 3 categorías principales: orientación del eje, tamaño o capacidad y ubicación.

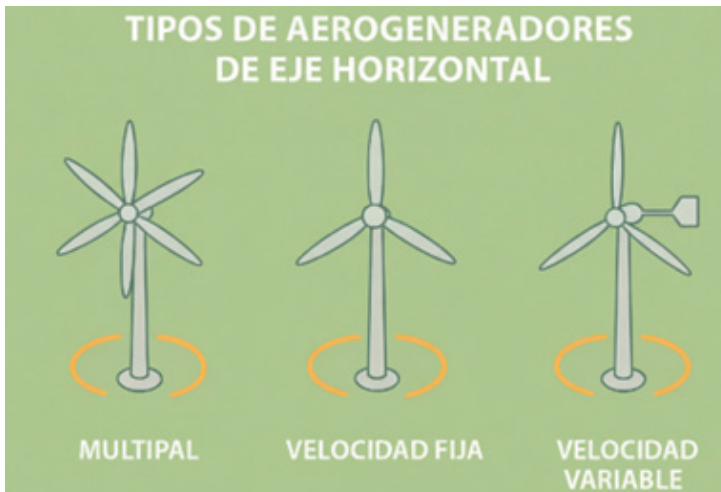


Figura No.2. Tipos de aerogeneradores de eje horizontal. Imagen realizada usando IA.

2. Eje vertical: Este tipo de aerogeneradores, como lo indica su nombre, su rotor o eje está colocado de forma vertical, son menos comunes que los de eje horizontal, pero encuentran mayor uso en ciudades o zonas donde el viento tiende a cambiar bastante. También existen subcategorías, las cuales son (Zepeda, 2017):

- Savonius: su diseño incluye palas o hélices semicilíndricas. Su diseño destaca por ser de bajo costo y sencillo, pero su eficiencia es menor. Generalmente, se usan en aplicaciones pequeñas de generación eléctrica.
- Darrieus: La forma de sus palas asemejan una C o también rectas en forma de H. Su diseño permite que sean más eficientes que otros aerogeneradores verticales, sin embargo, necesitan un impulso inicial externo para iniciar su funcionamiento.
- Giromill: Es una variante del tipo Darrieus, caracterizada por que sus palas son rectas.

Según su tamaño o capacidad (GWEC, 2023):

1. Pequeños: aerogeneradores con capacidad de generar entre 100 W y pocos kW, usados principalmente para alimentar pequeñas casas o cabañas aisladas, granjas, invernaderos, etc.
2. Medianos: Estos aerogeneradores tienen capacidad de generar de decenas a cientos de kW; con esta capacidad pueden generar la electricidad para producir una población pequeña.
3. Grandes: su capacidad se mide en MW y pueden generar suficiente electricidad para alimentar ciudades. Actualmente, existen prototipos capaces de generar 12 MW, cuyas palas llegan a superar los 100 m.

Según su ubicación (GWEC, 2023):

1. En tierra (*onshore*): Se catalogan así, cuando están ubicados o instalados en llanuras, desiertos, montañas, etc.
2. En el mar (*offshore*): Se encuentran instalados en el mar, donde los vientos son más constantes.

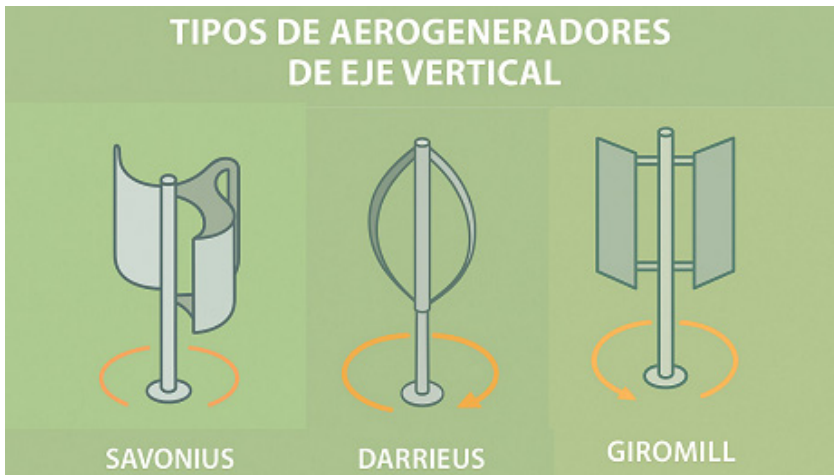


Figura No.3. Tipos de aerogeneradores de eje vertical. Imagen realizada usando IA.

¿Por qué el viento hace girar las palas de un aerogenerador?

Lo que impulsa o hace girar las palas de un aerogenerador cuando el viento incide sobre ellas es la aerodinámica, sí, la misma ciencia que hace volar a los aviones. La explicación no es tan simple como decir que el viento empuja a las palas y por eso rotan. La razón del movimiento rotatorio de las hélices se basa en el perfil o forma de las palas, las cuales son cuidadosamente diseñadas para aprovechar la diferencia de presiones que se produce cuando el aire o viento incide sobre la superficie de estas.

El aire se mueve como un flujo y, cuando circula o se desliza sobre una pala, su velocidad es

mayor en la parte superior que en la inferior. Aquí entra en juego el principio de Bernoulli (Anderson, 2010), el cual nos dice que al tener una mayor velocidad de flujo en la parte superior de la pala genera que la presión en esa zona sea menor, generando así una fuerza de sustentación (lift) que impulsa el giro de las palas. En general, este principio es el que se aplica en el impulso de los aviones hacia arriba y en el empuje lateral en el caso de los aerogeneradores. Este fenómeno físico se le conoce como efecto aerodinámico y es la columna vertebral de la tecnología de los aerogeneradores.

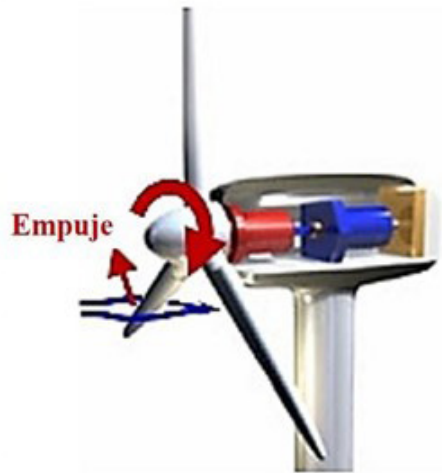
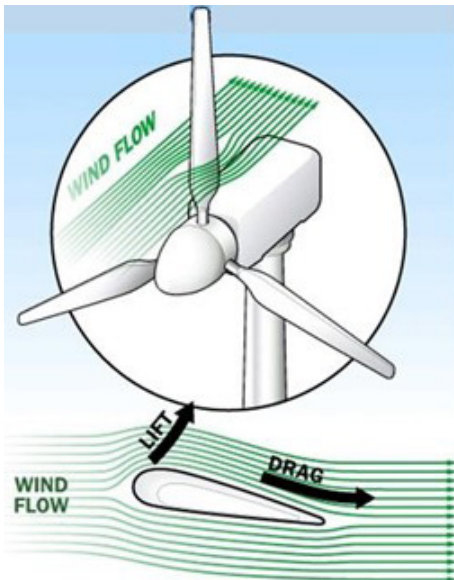


Figura No. 4. Figura esquemática del flujo del viento deslizándose en una pala, generando sobre la misma dos fuerzas: de empuje (lift) y de arrastre (drag). <https://unpocodecienciaporfavor.com/2018/06/01/Las-claves-del-funcionamiento-de-una-turbina-eolica/>

En el caso de los aerogeneradores de eje horizontal, las palas se diseñan y se colocan de una manera específica, de tal manera que se pueda mantener un ángulo de ataque determinado respecto al viento. El ángulo de ataque es un

parámetro muy importante que determina el grado de sustentación y arrastre que se genera en una pala, determinando la capacidad de giro del rotor y, por ende, cuánta energía se extrae del viento (Zepeda, 2017).

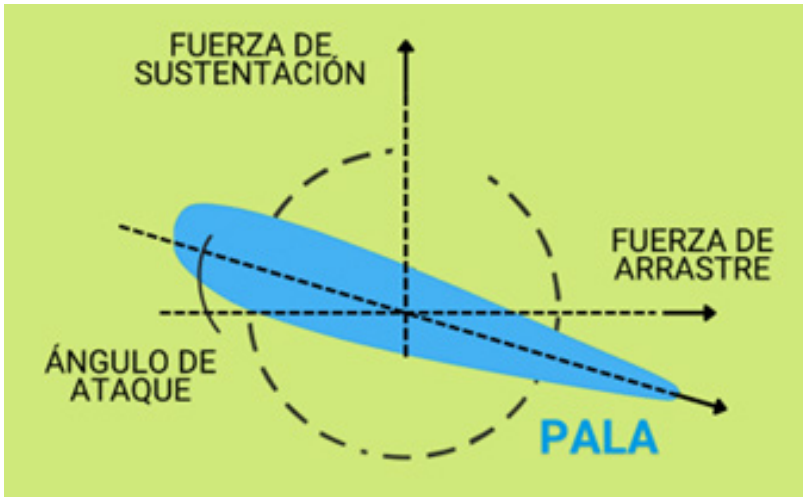


Figura No. 5 Parámetros que influyen en el movimiento de una pala generado por el viento. Elaboración propia.

En otras palabras, el ángulo de ataque es el grado de inclinación con el que el viento impacta o se desplaza sobre la pala. Si este ángulo es muy pequeño o nulo, la pala no girará; si es muy grande, el flujo de aire se separa, lo que genera turbulencia. En palabras simples, el ángulo de ataque determina la eficiencia

de empuje de la pala. Por esta razón, los sistemas modernos de control en aerogeneradores ajustan constantemente el ángulo de ataque de las palas, lo que optimiza la generación de energía en vientos muy variables; a este sistema de control se le conoce como pitch control (Burton et al., 2021).

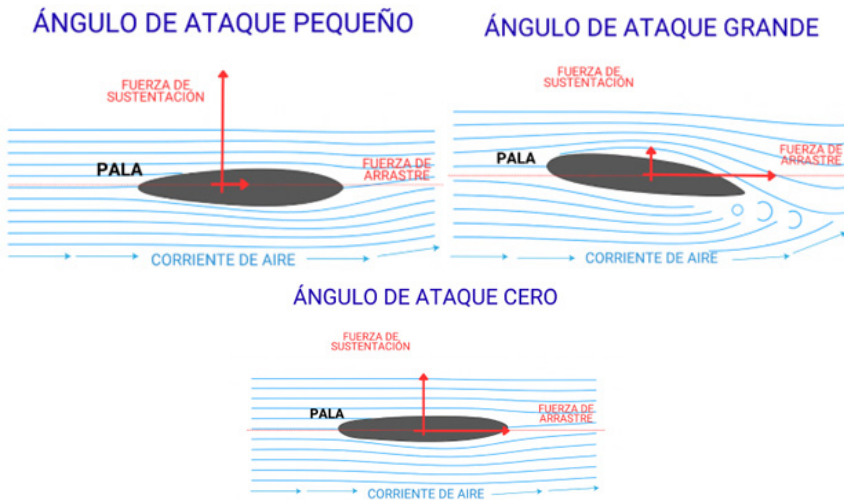


Figura No. 6. Ángulo de ataque en aerogeneradores. Elaboración propia.

Otro aspecto importante en la aerodinámica de las palas es la velocidad del rotor en la punta de cada pala. A medida que las palas se hacen cada vez más grandes, el radio del rotor incrementa, por consiguiente, la punta de las palas puede alcanzar velocidades de hasta 300 km/h, esto genera contaminación sonora debido al ruido producido, además, a esas velocidades, la estructura y componentes del aerogenerador se ven comprometidas (Manwell, McGowan & Rogers, 2011).

En cuanto a los aerogeneradores de eje vertical, dependiendo del diseño, el funcionamiento de sus palas puede basarse en la combinación de dos principios aerodinámicos: la fuerza de sustentación, o lift, que ya describimos anteriormente, y la fuerza de arrastre, o drag.

- En el aerogenerador tipo Savonius, se aprovecha la fuerza de arrastre, ya que, como se describió anteriormente, este tipo tiene palas semicilíndricas, lo que permite que el viento las empuje directamente, como una especie de vela de barco. La simplicidad de su diseño los hace ideales para medios urbanos; sin embargo, su eficiencia ronda el 15% del viento disponible, lo que los hace poco eficientes (Paraschivoiu, 2002; Da Silva, R.R., 2012).
- El aerogenerador tipo Darrieus tiene palas curvas y de perfil delgado, lo que

implica que su funcionamiento se basa en el principio de sustentación, tal como en los aerogeneradores horizontales. Estos aerogeneradores, debido a su diseño de palas, se caracterizan por ser silenciosos y por alcanzar eficiencias de hasta un 40% (Le Gourieres, 1982).

- En los de tipo Giromill, debido a sus palas rectas, su funcionamiento combina los principios de sustentación y arrastre, lo que permite un rendimiento estable en condiciones de viento variable o incluso turbulento (Tjiu et al., 2015).

Actualmente, los principales esfuerzos de investigación y desarrollo de generadores eólicos se enfocan en optimizar las propiedades estructurales y la geometría de las palas, usando herramientas de simulación computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés). Estas herramientas, por ejemplo, permiten simular y analizar el flujo de aire para minimizar los efectos de la turbulencia y así lograr un mejor rendimiento (Tummala et al., 2016; Islam, Mekhilef & Saidur, 2013).

Panorama de los generadores eólicos

Actualmente, países en todo el mundo están realizando esfuerzos para que la energía eléctrica producida sea a través de energías renovables, en este caso, producidas a través de campos eólicos, en México por ejemplo, cuyas



Figura No. 7. Parque eólico, Oaxaca, México. <https://www.elorienten.net/home/2012/10/31/inauguran-centrales-eolicas-la-venta-iii-y-oaxaca-i/>

condiciones geográficas son ideales para esta tecnología, tiene varios campos eólicos, siendo que Oaxaca concentra cerca del 60% de la capacidad instalada, otros estados como Tamaulipas, Baja California y Puebla, por mencionar algunos (AMDEE, 2024), también han estado sumando esfuerzos para incrementar su capacidad.

En el caso de Latinoamérica, destaca el país de Chile, sobre todo en la Patagonia, que es una de las zonas con mayor potencial eólico del mundo. Otro país que también ha apostado fuerte es Brasil, que ha implementado grandes parques eólicos costeros (GWEC, 2023).

Y a nivel mundial, los países líderes en esta tecnología son China, Estados Unidos y Alemania, donde son pioneros en la instalación de generadores eólicos en la modalidad offshore y turbinas capaces de generar 12 MW (Sanz, 2022).

Ejemplos de desarrollo y aplicación

- **En carreteras**

Se han realizado proyectos experimentales en los que se han colocado pequeños aerogeneradores (sobre todo de eje vertical) en las orillas de las

autopistas, avenidas o ejes con gran afluencia vehicular, para aprovechar el aire generado por el tránsito de los vehículos.

La electricidad producida por estos pequeños aerogeneradores alimenta el alumbrado público o podría destinarse a estaciones de recarga de autos eléctricos (RD-ICUAP, 2024).

- **En el mar**

El uso de la modalidad offshore ha aumentado debido a las condiciones del viento en el mar, que son más constantes y presentan menos obstáculos naturales o artificiales (montañas, edificios, etc.). Sin embargo, este tipo de aerogeneradores requiere una mayor inversión en infraestructura (GWEC, 2023).

- **Uso de simulaciones para desarrollo de prototipos**

El empleo de simulaciones permite a los ingenieros y científicos construir modelos y prototipos para predecir su comportamiento, ahorrando así costos de experimentación. En estas simulaciones, como se mencionó anteriormente, se puede analizar y optimizar el diseño de las palas



Figura No. 7. Parque eólico, Oaxaca, México. <https://www.eloriente.net/home/2012/10/31/inauguran-centrales-eolicas-la-venta-iii-y-oaxaca-i/>

para mejorar su respuesta al viento; también se pueden diseñar rotores con una mejor configuración de engranajes que permitan incrementar la velocidad de rotación de las palas. Estas simulaciones pueden llevarse a cabo mediante software especializado o incluso mediante software de cálculo técnico como Matlab (Zepeda, 2017). El análisis a través de simulaciones es clave para poder diseñar prototipos más eficientes y seguros.

El futuro de los generadores eólicos

La energía eólica, como otras energías renovables, enfrenta retos que debe resolver antes de que se convierta en una alternativa completamente viable para sustituir a las energías fósiles; tales retos son, por ejemplo, la intermitencia del viento, el uso y el reciclaje de las palas, así como la afectación ambiental y visual debido a los campos eólicos. Sin embargo, a estos retos también surgen posibles soluciones:

- Aerogeneradores con mayor eficiencia (más altos o con mejor diseño de palas, etc.).
- Palas fabricadas con materiales sostenibles y que puedan presentar buenas características mecánicas

- Combinación o integración con otras energías renovables, como las celdas solares.
- Integración de aerogeneradores en edificios, puentes, carreteras, etc.

Así como en las tecnologías de celdas solares, el futuro de los generadores eólicos parece apuntar a una integración cotidiana, y no solo en grandes parques eólicos.

Conclusión

El desarrollo de generadores eólicos evidencia el potencial de la energía del viento como alternativa sustentable frente a las fuentes convencionales de electricidad. Su capacidad de adaptación a distintas escalas de potencia y su bajo impacto ambiental consolidan su relevancia en la transición hacia sistemas energéticos más limpios y sostenibles. La fuerza “invisible” del viento ha estado presente en el desarrollo de las civilizaciones, desde mover barcos en el mar, molinos en las comunidades, hasta alimentar de electricidad a ciudades enteras. La humanidad tiene la oportunidad científica y tecnológica de seguir aprovechando cada vez más esta fuerza mediante generadores eólicos para avanzar hacia un futuro limpio y sustentable.



Figura No. 9. Perspectiva futurista de la integración de la energía eólica a las grandes ciudades. Imagen realizada usando IA.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, pueden compartirse a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (*ChatGPT, COPILOT, etc.*) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (*UPAEP*) por el apoyo otorgado al Dr. José Carlos Zepeda Medina y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (*SECIHTI*) por el apoyo otorgado a CVU-100841.

Referencias

- Anderson, J.D., Jr. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5a. ed). McGraw Hill. https://ia800808.us.archive.org/22/items/FundamentalsOfAerodynamics5thEdition/Fundamentals_of_Aerodynamics_5th_edition.pdf
- Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2024). Informe anual de energía eólica en México. <https://www.amdee.org>
- Burton, T. L., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. and Graham, M. (2021). *Wind Energy Handbook* (3a. ed.). John Wiley and sons.
- Da Silva, R. R. (2012). Integral analysis of rotors of a wind generator. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(8), 6128-6138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.070>
- Global Wind Energy Council (2023). *Global Wind Report 2023*. <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>
- Hernández, E. y Alvarado J.J. (2024). Energía eólica impulsada por tráfico vehicular, una opción para el consumo de energía eléctrica por alumbrado público. RD-ICUAP, 10(Número Especial Posgrado ICUAP), 122-132. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2024.29.1345>
- Islam, M.R., Mekhilef, S. and Saidur, R. (2013). Progress and recent trends of wind energy technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 21, 456-468. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.007>
- Le Gourieres, D. (1982). *Wind Power Plants: Theory and Desing*. Pergamon Press.
- Manwell, J.F., McGowan, J. G. and Rogers, A.L. (2011). *Wind Energy Explained: Theory, Desing and Application*(2a. ed.). Wiley.
- Paraschivoui, I. (2002). *Wind Turbine Desing: With Emphasis on Darrieus Concept*. Polytechnic International Press. <https://books.google.com.mx/>
- Tipler, P.A. and Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers* (6a. ed.). Freeman and company.
- Tijju, W. Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M.H., and Sopian, K. (2015). Darrieus Vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. *Renewable Energy*, 75, 50-67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha. D.K., Indraj, V. and Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 56, 1351-1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Zepeda, J.C. (2017). *Modelo en Simulink de un generador eólicos de imanes permanentes* [Tesis de maestría no publicada]. Instituto Tecnológico de Puebla