

ENERGÍA EÓLICA Y AEROGENERADORES: LA REVOLUCIÓN VERDE IMPULSADA POR EL VIENTO

WIND ENERGY AND WIND TURBINES: THE GREEN REVOLUTION DRIVEN BY WIND

RESUMEN

El uso de combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, para la generación de electricidad produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (CO_2), que contribuyen al calentamiento global, un fenómeno que impulsa el cambio climático. Una forma de mitigar el impacto ambiental del sector eléctrico es impulsar una transición energética hacia fuentes renovables, entre las que destaca la energía eólica. Esta fuente energética ha acompañado a la humanidad desde hace más de tres mil años: los antiguos egipcios ya aprovechaban la fuerza del viento para impulsar embarcaciones, y en la Edad Media se utilizaba para accionar molinos. Sin embargo, no fue sino hasta 1887 cuando el viento se empleó por primera vez para generar electricidad, mediante la construcción del primer aerogenerador. La energía eólica aprovecha la energía cinética del viento para producir electricidad por medio de aerogeneradores, dispositivos diseñados para transformar el movimiento del aire en energía eléctrica. Aunque existen diferentes tipos, todos comparten cuatro componentes fundamentales: el rotor, el sistema de transmisión, el generador eléctrico y el sistema de control. Los aerogeneradores se clasifican según diversos criterios: a) por la orientación de su eje, pueden ser de eje horizontal o de eje vertical; b) por su potencia, se dividen en microeólicos, minieólicos y de gran escala; y c) por su ubicación, pueden ser terrestres (onshore) o marinos (offshore). Actualmente, la energía eólica es una tecnología madura que genera alrededor del 8.1 % de la electricidad mundial, mientras que en México su participación alcanza el 5.9 %. A pesar de su crecimiento sostenido, este sector enfrenta diversos desafíos, entre ellos incrementar la eficiencia de los aerogeneradores, reducir su impacto en la biodiversidad, disminuir el ruido y el efecto visual en el paisaje, así como optimizar la gestión y el reciclaje de los materiales al final de su vida útil.

Palabras clave: *energía eólica; aerogeneradores; capacidad instalada.*

ZÚÑIGA AVILÉS, Dalia

MARTÍNEZ LÓPEZ, Miguel

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio

División de Ingeniería Industrial e
Ingeniería en Energía y Desarrollo
Sostenible, Universidad
Politécnica del Valle de Toluca.
Almoloya de Juárez, Estado de
México, México.

Correspondencia
miguel.martinez@upvt.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3800-9719>

Fecha de recepción
19 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación
26 de septiembre de 2026.

ABSTRACT

The use of fossil fuels, such as coal and natural gas, for electricity generation produces large amounts of greenhouse gases, primarily carbon dioxide (CO₂), which contribute to global warming, the main driver of climate change. One way to mitigate the environmental impact of the electricity sector is to promote an energy transition toward renewable sources, among which wind energy stands out. Wind energy has been utilized by humanity for more than three thousand years. The ancient Egyptians harnessed wind power to propel boats, and during the Middle Ages, it was used to operate mills. However, it was not until 1887 that wind was first used to generate electricity with the construction of the first wind turbine. Wind energy converts the kinetic energy of moving air into electricity through wind turbines, devices designed to transform airflow into electrical power. Although there are different types of wind turbines, they all share four fundamental components: the rotor, the transmission system, the electric generator, and the control system. Wind turbines can be classified according to several criteria: (a) by axis orientation, as horizontal-axis or vertical-axis; (b) by power capacity, as micro, mini, or large-scale; and (c) by installation location, as onshore or offshore. Wind energy is now a mature technology, generating approximately 8.1 % of the world's electricity. In Mexico, its share reaches 5.9 %. Despite its sustained growth, the sector faces several challenges, including improving turbine efficiency, reducing impacts on biodiversity, minimizing noise and visual effects on the landscape, and optimizing material management and recycling at the end of turbine life.

Keywords: wind energy; wind turbines; installed capacity.

INTRODUCCIÓN

Para mantener el estilo de vida actual y llevar a cabo nuestras actividades cotidianas, se requiere la producción de grandes cantidades de energía, principalmente energía eléctrica. Esta energía es esencial para producir, conservar y distribuir los alimentos que consumimos, fabricar y operar los dispositivos electrónicos que utilizamos, así como para el funcionamiento de los medios de transporte, como automóviles, autobuses, metro y aviones. También es indispensable para la fabricación y distribución de la ropa y los utensilios de uso diario.

La generación de energía eléctrica puede realizarse principalmente a través de dos tipos de fuentes: las convencionales (no renovables) y las renovables. Las fuentes no renovables provienen de combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, que se queman para producir electricidad. El principal problema de estas fuentes es que son recursos finitos, generan contaminación y emiten gases de efecto invernadero. Por otro lado, las fuentes renovables aprovechan recursos naturales que son inagotables o se regeneran continuamente, como la energía del sol, el viento y el agua. Entre los ejemplos más representativos se encuentran la energía hidroeléctrica, solar y eólica.

Actualmente, el uso intensivo de combustibles fósiles para generar electricidad es una de las principales causas del cambio climático. En 2024, cerca del 60 % de la electricidad producida a nivel mundial se obtuvo mediante la quema de combustibles fósiles; el carbón fue la fuente más utilizada, con un 35 %, seguido del gas natural, con un 22 % (IEA, 2024). La combustión de estos combustibles libera grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera, entre ellos dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Los tres últimos se consideran gases de efecto invernadero (GEI), ya que atrapan el calor en la atmósfera y elevan la temperatura media del planeta. Este fenómeno provoca diversos impactos ambientales y sociales, como el derretimiento de glaciares y casquetes polares (con el consecuente aumento del nivel del mar), la alteración de los patrones climáticos que ocasiona sequías, lluvias extremas e incendios forestales, así como la pérdida de biodiversidad y el deterioro de los ecosistemas. Además, estas consecuencias generan impactos económicos y sociales importantes, especialmente en las comunidades más vulnerables (Murphy, 2024).

Con el objetivo de reducir el impacto ambiental y mitigar el cambio climático, en las últimas décadas se ha impulsado una transición energética hacia fuentes renovables de generación eléctrica, como la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Estas tecnologías permiten producir electricidad con emisiones significativamente menores de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la construcción de un sistema energético más limpio, eficiente y sostenible (IRENA, n. d.).

En el contexto de la crisis climática y de la transición energética global, la energía eólica se ha consolidado como una de las tecnologías renovables más relevantes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar la matriz eléctrica mundial. Su rápida expansión, competitividad económica y madurez tecnológica la han posicionado como un pilar estratégico en los escenarios internacionales de descarbonización del sector eléctrico (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022)

1. ENERGÍA EÓLICA

En la actualidad, nuestra forma de vida depende cada vez más de la electricidad, y el rápido crecimiento de la población mundial ha incrementado notablemente la demanda de energía. Entre las fuentes de energía renovable con mayor potencial y desarrollo para la generación de electricidad se encuentra la energía eólica, la cual destaca por su alto grado de madurez tecnológica y por ser una de las alternativas más consolidadas del sector energético.

Pero, ¿qué es la energía eólica? Antes de responder a esta pregunta, conviene recordar que el aprovechamiento del viento no es algo nuevo. La humanidad ha utilizado la energía eólica desde hace más de tres mil años: los antiguos egipcios impulsaban sus embarcaciones con velas que aprovechaban la fuerza del viento. Más tarde, en Persia (actual Irán), se construyeron los primeros molinos de viento de eje vertical (alrededor del siglo VII). Durante la Edad Media (del siglo V al XV), estos molinos se extendieron por Europa y se emplearon para moler granos y bombear agua. Sin embargo, no fue sino hasta el siglo XIX cuando surgieron los primeros aerogeneradores capaces de producir electricidad (figura 1). El primero de ellos fue construido en 1887 por Charles F. Brush, quien diseñó un rotor de 17 metros de diámetro con 144 palas de madera.



Ahora que sabemos que el ser humano ha aprovechado la energía eólica desde hace más de tres mil años, podemos explicar en qué consiste y cuál es su origen. La fuente de la energía eólica es el



Figura 1. Uso de la energía eólica a lo largo de la historia.

Sol. La Tierra recibe más radiación solar en el ecuador que en los polos, lo que provoca un calentamiento desigual de su superficie. Además, la tierra y el agua absorben y liberan calor a diferentes tasas. En las zonas donde la radiación solar es más intensa (en el ecuador), el aire se calienta, disminuye su densidad y asciende. En cambio, en las regiones donde llega menos radiación solar, el aire es más frío, su densidad aumenta y desciende. En términos sencillos, el aire caliente asciende y genera una zona de baja presión, mientras que el aire frío desciende y produce una zona de alta presión (figura 2). Esta diferencia de presiones origina el movimiento del aire, es decir, el viento, ya que la atmósfera tiende a equilibrar esas diferencias desplazando el aire desde las zonas de alta presión hacia las de baja presión.

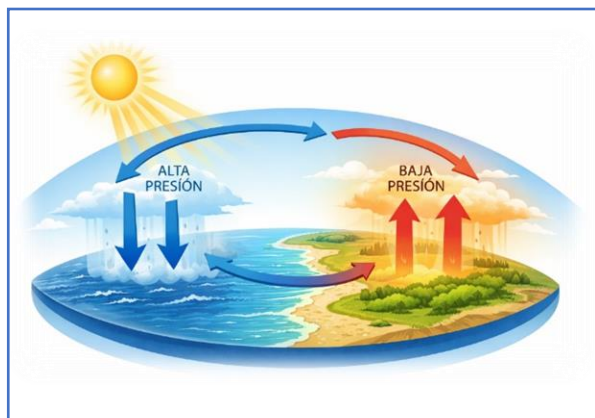


Figura 2. Origen del viento.

El movimiento del aire da origen a la energía eólica, una fuente renovable que aprovecha la energía cinética del viento para transformarla posteriormente en electricidad mediante aerogeneradores o turbinas eólicas. Esta forma de energía se ha convertido en uno de los pilares fundamentales de la transición energética global

debido a su bajo impacto ambiental y a su capacidad para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, contribuyendo así a mitigar el cambio climático.

Desde el punto de vista económico, la energía eólica representa una de las tecnologías de generación eléctrica más competitivas en la actualidad, ya que



sus costos de instalación y operación han disminuido considerablemente en la última década gracias a los avances tecnológicos, las economías de escala y las mejoras en eficiencia. Además, al no requerir combustible, reduce la exposición a la volatilidad de los precios internacionales del petróleo y del gas natural, lo que brinda mayor estabilidad a los sistemas eléctricos nacionales (Oliver et al., 2026).

Asimismo, la industria eólica impulsa el desarrollo económico regional mediante la generación de empleos directos e indirectos en la fabricación, instalación, operación y mantenimiento de parques eólicos. También atrae inversión extranjera, promueve la innovación tecnológica y fortalece cadenas de suministro locales. En zonas rurales, donde comúnmente se instalan los parques eólicos, se generan ingresos adicionales a través de arrendamientos de tierras y contribuciones fiscales, lo que dinamiza la economía local. En este sentido, la energía eólica no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también se consolida como un motor estratégico de crecimiento económico, seguridad energética y competitividad industrial en el marco de la transición hacia sistemas energéticos más limpios y resilientes (Xia & Song, 2017).

Los recursos eólicos son abundantes y se distribuyen por casi todo el planeta, lo que les otorga un enorme potencial de desarrollo. Actualmente, las principales centrales eólicas se concentran en regiones como Europa, Norteamérica y Asia, con países europeos como Dinamarca, Alemania y España acumulando amplia experiencia en el aprovechamiento del viento. Sin embargo, China desempeña hoy un papel central en el sector eólico a nivel global y es el país con mayor capacidad instalada del mundo, seguido por Estados Unidos y varios países europeos. Esta posición destaca no solo su capacidad para implementar grandes proyectos eólicos, sino también su influencia en la evolución del mercado y en las cadenas de suministro globales (Zhang et al., 2020).

2. AEROGENERADORES

Una turbina eólica es un dispositivo clave en la generación de electricidad a partir del viento. Su funcionamiento se basa en la conversión de la energía cinética del aire en energía eléctrica; para ello, cuenta con cuatro componentes principales: el rotor, el sistema de transmisión, el generador y

la unidad de control. El rotor está compuesto por palas de diseño aerodinámico que capturan la energía del viento. Cuando las corrientes de aire ejercen fuerza sobre ellas, el rotor comienza a girar, convirtiendo la energía eólica en energía mecánica rotacional. Esta energía se transmite posteriormente al generador a través del sistema de transmisión, donde se convierte en electricidad mediante el principio de inducción electromagnética (fenómeno por el cual un campo magnético cambiante produce una corriente eléctrica). En términos generales, un aerogenerador requiere velocidades de viento mínimas de entre 3 y 5 metros por segundo (m/s) para comenzar a operar, mientras que las velocidades óptimas se sitúan entre 12 y 14 m/s. Cuando el viento supera los 25 m/s, el sistema se detiene automáticamente por razones de seguridad, a fin de evitar daños en sus componentes y reducir el riesgo de accidentes.

2.1 PARTES PRINCIPALES DE UN AEROGENERADOR

En la actualidad, existe una amplia variedad de aerogeneradores (también conocidos como generadores eólicos o turbinas eólicas), que se clasifican principalmente de acuerdo con la orientación de su eje, su ubicación y su tamaño. A pesar de estas diferencias, todos comparten una estructura básica integrada por cuatro elementos fundamentales: el rotor, el sistema de transmisión, el generador y la unidad de control (figura 3). A continuación, se describe de manera breve la función de cada uno de estos componentes:

- Rotor. Su función principal es captar la energía del viento mediante palas o aspas de diseño aerodinámico, similar al de las alas de un avión. Cuando el aire fluye alrededor de estas palas, se produce una diferencia de presión entre sus caras, lo que genera una fuerza de sustentación que hace girar el rotor. Este movimiento inicia el proceso de conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica.
- Eje y sistema de transmisión. Su función es transferir la energía mecánica generada por el rotor al generador eléctrico. El sistema incluye dos ejes principales: el eje de baja velocidad, que conecta el rotor con la caja de cambios o multiplicadora, encargada de aumentar la velocidad de rotación; y el eje de alta velocidad, que conecta la caja de cambios con el generador eléctrico. Además, la caja de engranes incrementa las revoluciones por minuto (rpm) provenientes del rotor hasta alcanzar las rpm necesarias para que el

generador produzca electricidad de manera eficiente. Mientras el rotor de un aerogenerador suele girar a velocidades relativamente bajas (por ejemplo, entre 10 y 30 rpm en turbinas de gran escala), el generador eléctrico requiere velocidades considerablemente mayores, del orden de 1,000 a 1,800 rpm, según el diseño y la frecuencia del sistema eléctrico. Por ello, la caja multiplicadora adapta la velocidad y el par mecánico, permitiendo que el generador opere en condiciones óptimas. En algunos diseños modernos, en particular en los aerogeneradores de accionamiento directo (direct drive), se prescinde de la caja de engranes y se emplean generadores de baja velocidad y mayor diámetro, lo que reduce la cantidad de componentes mecánicos y puede disminuir las necesidades de mantenimiento (Van de Kaa et al., 2020).

- Generador eléctrico. Su función es transformar la energía mecánica, transmitida desde el sistema de transmisión, en energía eléctrica.
- Unidad de control. Su función es supervisar y regular el funcionamiento del aerogenerador, por lo que constituye un componente esencial para garantizar su seguridad y eficiencia. Este sistema cuenta con diversos sensores que miden variables como la temperatura, las vibraciones y la potencia. La información recopilada se envía a una unidad de monitoreo que procesa los datos y toma decisiones en tiempo real. La unidad de control permite optimizar la generación de energía eléctrica y, en caso de condiciones adversas, como vientos excesivos o fallas en algún componente, puede frenar o detener el aerogenerador para evitar daños y mantener su operación segura. Los sistemas de control en aerogeneradores pueden clasificarse en pasivos o activos, dependiendo de su diseño y nivel de complejidad. Los sistemas de control pasivos se utilizan en aerogeneradores de baja potencia (generalmente hasta 5 kW). Funcionan sin mecanismos electrónicos complejos y se basan en principios aerodinámicos o mecánicos para regular la potencia. Por ejemplo, pueden utilizar la pérdida aerodinámica (stall control) o colas direccionales que orientan automáticamente el rotor hacia el viento. Estos sistemas son más simples, económicos y requieren menor mantenimiento. Por su parte, los sistemas de control activos se emplean en aerogeneradores de gran capacidad (del orden de los MW). Incorporan sistemas electrónicos avanzados, actuadores hidráulicos

o eléctricos y algoritmos de control que permiten ajustar dinámicamente el ángulo de las palas (pitch control) y la orientación de la góndola (yaw control). Gracias a estos ajustes, se maximiza la captación de energía en condiciones normales y se protege la turbina ante vientos excesivos, ya que el sistema puede frenar o detener el rotor cuando es necesario (Apata & Oyedokun, 2020).

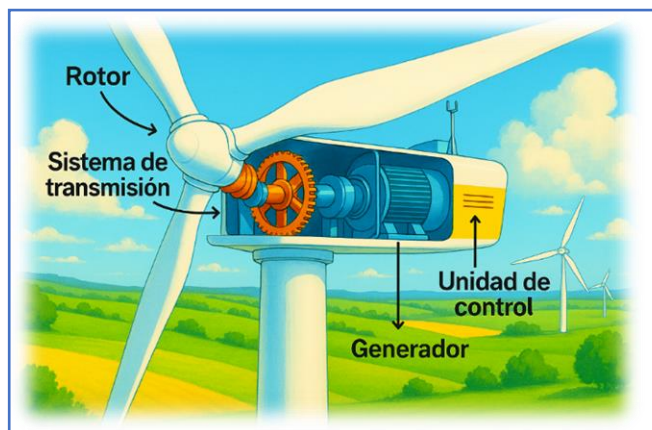


Figura 3. Partes de un aerogenerador.

2.2 TIPOS DE AEROGENERADORES

A. Según la orientación del eje. Se clasifican en aerogeneradores de eje horizontal y aerogeneradores de eje vertical (figura 4):

- Aerogeneradores de eje horizontal. Este tipo de aerogeneradores es el más común y presenta el mayor grado de desarrollo y madurez tecnológica en comparación con los de eje vertical. Por razones de estabilidad, eficiencia y facilidad de mantenimiento, la mayoría cuenta con tres palas unidas a un eje orientado paralelamente al suelo. Para alcanzar un alto rendimiento, requieren vientos fuertes y constantes. Debido a su tamaño y diseño, necesitan torres de gran altura, ya que la velocidad del viento aumenta conforme se incrementa la altitud, como consecuencia del comportamiento de la capa límite atmosférica: cerca del suelo, la fricción con la superficie terrestre (rugosidad del terreno, edificaciones, vegetación) reduce la velocidad del viento y genera mayor turbulencia. A mayor altura, la influencia de esta fricción disminuye, el flujo de aire se vuelve más uniforme y la velocidad media del viento aumenta, lo que incrementa significativamente la energía disponible, pues la

potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Además, pueden instalarse tanto en tierra (onshore) como en el mar (offshore) (Mata et al., 2024).

- Aerogeneradores de eje vertical. Estos aerogeneradores son menos comunes que los de eje horizontal y se clasifican en tres tipos principales: Savonius, Darrieus e híbridos (Darrieus-Savonius). El tipo Savonius es el diseño más simple. Se considera un aerogenerador “lento” porque opera a bajas velocidades de rotación, generalmente entre 50 y 200 rpm. Presenta menor eficiencia y puede generar mayor ruido; sin embargo, tiene la ventaja de funcionar con vientos de baja intensidad. Por ello, suele emplearse en aplicaciones de pequeña potencia o en entornos donde la simplicidad y la fiabilidad son prioritarias.
- Los aerogeneradores tipo Darrieus, en cambio, presentan mayor eficiencia aerodinámica, pero requieren asistencia para iniciar su funcionamiento, ya que no pueden arrancar por sí solos. Se consideran aerogeneradores “rápidos”, pues operan entre 150 y 600 rpm, pueden adaptarse a cambios en la dirección del viento y se instalan en zonas con vientos de baja o media intensidad. No obstante, generan mayor ruido y vibraciones que los Savonius y su mantenimiento puede resultar más complejo (Lee et al., 2024).

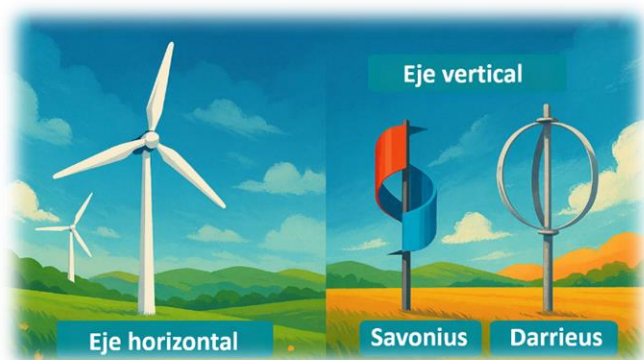


Figura 4. Tipos de aerogeneradores según la orientación de su eje: aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical.

B. Según su potencia. La clasificación de los aerogeneradores según su potencia nominal se puede establecer de la siguiente manera:

- Microeólicos. Son equipos con una potencia inferior a 20 kW,

utilizados principalmente para el suministro de electricidad en viviendas o en zonas rurales aisladas. Se emplean en hogares, pequeñas instalaciones agrícolas y sistemas híbridos (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

- Minieólicos. Incluyen aerogeneradores con potencias entre 20 y 200 kW, destinados principalmente a la generación de energía para autoconsumo o para la venta de electricidad a la red. Se utilizan en pequeñas comunidades y en instalaciones comerciales o industriales (Husien et al., 2013).
- Eólicos de gran escala. Comprenden aerogeneradores con potencias superiores a 200 kW que forman parte de parques eólicos conectados a la red eléctrica (Dixon et al., 2025).

C. Según su ubicación. Se clasifican en terrestres y marinos:

- Terrestres (onshore). Las turbinas son instaladas en tierra firme como llanuras, colinas o zonas montañosas. Se usan generalmente aerogeneradores de eje horizontal con potencias individuales de 2 a 6 MW con tamaños de rotor y altura de la torre de más de 100 metros. Tienen un impacto visual y acústico considerable, por lo que se recomienda instalarlos en zonas alejadas de la población.
- Marinos (offshore). Se instalan en el mar, donde el viento es más constante y de mayor intensidad. Los aerogeneradores que se colocan en estos entornos generalmente son de eje horizontal, con potencias superiores a 8 MW. El diámetro de sus rotores puede superar los 200 metros (Burton et al., 2011).

3. PANORAMA GLOBAL DE LA ENERGÍA EÓLICA

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), los países que lideran la capacidad eléctrica instalada en energía eólica son China, Estados Unidos, Alemania, India y España (figura 5) (IRENA, 2025).



Figura 5. Energía eólica en el mundo: capacidad instalada en 2023.



En el año 2023, China registró una capacidad de 441.8 GW, seguida por Estados Unidos con 147.5 GW, Alemania con 69.4 GW, India con 44.7 GW y España con 30.8 GW. Por otro lado, Graham et al. (2025), en el Global Electricity Review 2025 de Ember, reportaron que, del total de la electricidad generada a nivel mundial en 2024, el 40 % provino de fuentes bajas en carbono, impulsado principalmente por el crecimiento de la energía solar y eólica. En este contexto, la energía eólica ocupó el tercer lugar en contribución, con una participación del 8.1 % (Graham et al., 2025).

En el caso de México, la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) reportó que, para 2023, la capacidad instalada de energía eólica alcanzó 7.7 GW. Del total de electricidad generada en el país, aproximadamente 5.98 % provino de esta fuente. Esta industria genera cerca de 9,500 empleos directos y evita la emisión de alrededor de 9 millones de toneladas de CO₂ al año, lo que equivale a retirar de circulación aproximadamente 2.2 millones de automóviles (AMDEE, 2025).

De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2024–2038), se prevé ampliar la capacidad instalada de energía eólica durante los próximos quince años, así como fortalecer el papel de las energías renovables en la matriz eléctrica nacional, lo que contribuirá a la transición energética planificada en el país (Secretaría de Energía [SENER, 2024]).

CONCLUSIONES

Con el fin de mitigar el cambio climático, es necesario implementar diversas acciones orientadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero,

los principales responsables del calentamiento global. Una de las estrategias más efectivas para lograrlo es impulsar el uso de energías renovables, especialmente la solar fotovoltaica y la eólica. Ambas permiten generar electricidad de manera sostenible, que se emplea tanto en las actividades cotidianas como en la producción y operación de dispositivos y medios de transporte.

La energía eólica, en particular, aprovecha la energía cinética del viento para producir electricidad con una baja huella de carbono. A nivel mundial, ocupa el tercer lugar entre las tecnologías de generación eléctrica con menores emisiones, con una participación del 8.1 %. En el caso de México, esta cifra es de 5.9 %.

No obstante, el desarrollo de la energía eólica enfrenta diversos retos que deben superarse para asegurar su crecimiento sostenido. Entre ellos se encuentran mejorar la eficiencia de las turbinas, minimizar el impacto en la biodiversidad y en el uso del suelo, reducir los efectos visuales y acústicos, y optimizar la gestión de los residuos generados al término de la vida útil de los aerogeneradores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación a través del Programa “Investigadoras e Investigadores COMECYT 2025”, folio EESP2025-0006.

REFERENCIAS

- Apata, O., & Oyedokun, D. T. O. (2020). An overview of control techniques for wind turbine systems. *Scientific African*, 10, e00566.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00566>
- Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2025). *Informe anual AMDEE 2025*.
https://amdee.org/es_es/project/informe-anual-amdee-2025/
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119992714>



- Dixon, S. L., Hall, C. A., & Zhao, D. (2025). *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2023-0-50955-3>
- Graham, E., Fulghum, N., & Altieri, K. (2025). *Global electricity review 2025*. Ember. <https://ember-energy.org/es/analisis/global-electricity-review-2025/>
- Husien, W., El-Osta, W., & Dekam, E. (2013). Effect of the wake behind wind rotor on optimum energy output of wind farms. *Renewable Energy*, 49, 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.048>
- International Energy Agency. (2025, October 22). *Global electricity generation by source, 2024* [Chart]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-generation-by-source-2024>
- International Renewable Energy Agency. (s. f.). *Country rankings*. Retrieved September 28, 2026, from <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>
- International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable power generation costs in 2024*. <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*, 36(7), 1887–1901. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.002>
- Lee, K.-Y., Cruden, A., Ng, J.-H., & Wong, K.-H. (2024). Variable designs of vertical axis wind turbines—a review. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1437800. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1437800>
- Mata, S. A., Pena Martínez, J. J., Bas Quesada, J., Palou Larrañaga, F., Yadav, N., Chawla, J. S., Sivaram, V., & Howland, M. F. (2024). Modeling the effect of wind speed and direction shear on utility-scale wind turbine power production. *Wind Energy*, 27(9), 873–899. <https://doi.org/10.1002/we.2917>
- Murphy, R. (2024). What is undermining climate change mitigation? How fossil-fuelled practices challenge low-carbon transitions. *Energy Research & Social Science*, 108, 103390. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103390>
- Oliver, M. E., Chapman, O., Grijalva, S., Matisoff, D. C., Ramadhani, M., & West, A. (2026). Managing zero-marginal-cost, intermittent renewable energy: A survey of the

engineering, economic, and policy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116334. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116334>

Secretaría de Energía. (2024, May 31). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024–2038*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038>

Van de Kaa, G., van Ek, M., Kamp, L. M., & Rezaei, J. (2020). Wind turbine technology battles: Gearbox versus direct drive—Opening up the black box of technology characteristics. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119933. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119933>

Xia, F., & Song, F. (2017). Evaluating the economic impact of wind power development on local economies in China. *Energy Policy*, 110, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.030>

Zhang, S., Wei, J., Chen, X., & Zhao, Y. (2020). China in global wind power development: Role, status and impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109881. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109881>

