



## ¿Recolección de energía limpia en México?

### Clean Energy Harvesting in Mexico?

Daniel Hernández-Rivera<sup>1</sup>, David Sánchez-Luna<sup>2</sup>, María Belem Arce-Vázquez<sup>3</sup>, Yuri Sara Hernández-Demesa<sup>4</sup> y Ángel Eduardo Márquez-Ortega<sup>5</sup>

<sup>1</sup> División de Ingeniería en Energías Renovables, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, Estado de México, México, 56380.

<sup>2</sup> División de Gestión de la Producción, Universidad Tecnológica de Nezahualcóyotl, Estado de México, México, 57000.

<sup>3</sup> División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México, México, 55210.

<sup>4</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelos, México, 62580

<sup>5</sup> División de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Chimalhuacán, Estado de México, México, 56335,

\*Correspondencia: [daniel.rivera@teschic.edu.mx](mailto:daniel.rivera@teschic.edu.mx)

#### Resumen

La recolección de energía es un proceso que permite obtener electricidad utilizable a partir de la captura y conversión de diversas formas de energía ambiental, que pueden incluir desde la radiación solar hasta las vibraciones generadas por el tráfico vehicular. México, gracias a su ubicación geográfica, posee un alto potencial para la generación de energía, ya que cuenta con una amplia variedad de recursos naturales como la energía solar, eólica, hidráulica y geotérmica, entre otras. Considerando la necesidad global de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar el impacto ambiental, resulta fundamental explorar nuevas oportunidades para optimizar la generación de energía mediante distintas técnicas de recolección.

**Palabras clave:** Recolección de energía, energías renovables, energías limpias.

#### Abstract

Energy harvesting is a process that enables the generation of usable electricity by capturing and converting various forms of ambient energy, ranging from solar radiation to vibrations produced by vehicular traffic. Due to its geographical location, Mexico has great potential for energy generation, as it possesses a wide variety of natural resources, including solar, wind, hydro, and geothermal energy, among others. Given the global need to reduce greenhouse gas emissions and minimize environmental impact, it is essential to explore new opportunities to optimize energy generation through different harvesting techniques.



## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

**Keywords:** Energy harvesting, renewable energy, clean energy.

### 1. Introducción

Las energías renovables son un tipo de energía proveniente de fuentes naturales que podrían verse inagotables a escala humana debido a que son reabastecidas más rápido de lo que son consumidas. Dentro de los diferentes tipos de fuentes de energía renovable existe un tipo energías que tienen un impacto mínimo en el medio ambiente y han sido designadas como energías limpias. La energía solar, eólica, geotérmica e hidráulica son las principales fuentes de energía limpia ya que no generan de manera directa gases de efecto invernadero.

La recolección de energía es un proceso para obtener energía del ambiente. El concepto de recolección de energía se refiere a la generación de energía eléctrica a partir de la recolección, a través de transductores, de la energía que se encuentra circulando en el ambiente; ejemplos de estos tipos de energía, son el calor, movimiento, vibraciones, y radiación. Bajo este concepto, el aprovechamiento de las principales fuentes de energía (solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica) podría ser considerada recolección de energía limpia.

El presente artículo muestra un panorama general del potencial de México para la generación de energía limpia a través de la recolección de las energías renovables ya conocidas y la exploración de nuevas fuentes de energía limpia.

### 2. Recolección de energía

La recolección de energía conocida por su nombre en inglés como *Energy Harvesting* (Sezer & Koç, 2021), es una técnica ingenieril que permite recolectar energía del ambiente y transformarla en energía eléctrica aprovechable. Los sistemas de recolección de energía están formados por tres partes principales: la fuente de energía ambiental, el transductor y la carga. Por la naturaleza en la que está basada esta

tecnología la fuente de energía ambiental debería de ser un tipo de fenómeno que suceda de manera natural y que sea periódico, ejemplo de ello podría ser la radiación solar, el flujo de agua de los ríos, el oleaje, el viento, el calor del centro de la tierra, la vibración mecánica en una carretera por la circulación vehicular (Ding et al., 2018), el calor disipado en un calentador de agua doméstico (Kütt et al., 2018), entre otras. El dispositivo transductor es el encargado de convertir la energía primaria en energía eléctrica. El tipo de transductor necesario depende de la naturaleza de la fuente primaria de energía. Para una fuente de energía mecánica se puede utilizar un material piezoeléctrico o un elemento de inducción electromagnética como el generador eléctrico. Para una fuente de energía calorífica se puede utilizar un dispositivo termoeléctrico, por otro lado, para la energía solar se utiliza una celda fotovoltaica. Finalmente, la carga sería un elemento que consume o almacena energía; ejemplos de estos pueden ser un teléfono, un motor eléctrico, una batería de 12 volts, las luminarias de una calle, etcétera. Saber las características de la carga que se va a alimentar con la energía eléctrica es importante porque definirá las capacidades del dispositivo recolector de energía en cuanto al suministro eléctrico que pueda proporcionar (Liu et al., 2020; Pradeesh et al., 2022).

### 3. La importancia de las energías limpias

El impacto de las energías limpias en la generación de gases contaminantes es mínimo. La energía solar, la eólica, hidráulica, geotérmica y la biomasa son las principales fuentes limpias de energía renovable. El uso de las energías renovables es una alternativa viable para la descarbonización de la energía, coadyuvando al desarrollo social y contribuyendo de manera positiva al cambio climático, contribuye a la mitigación de impactos causados por las



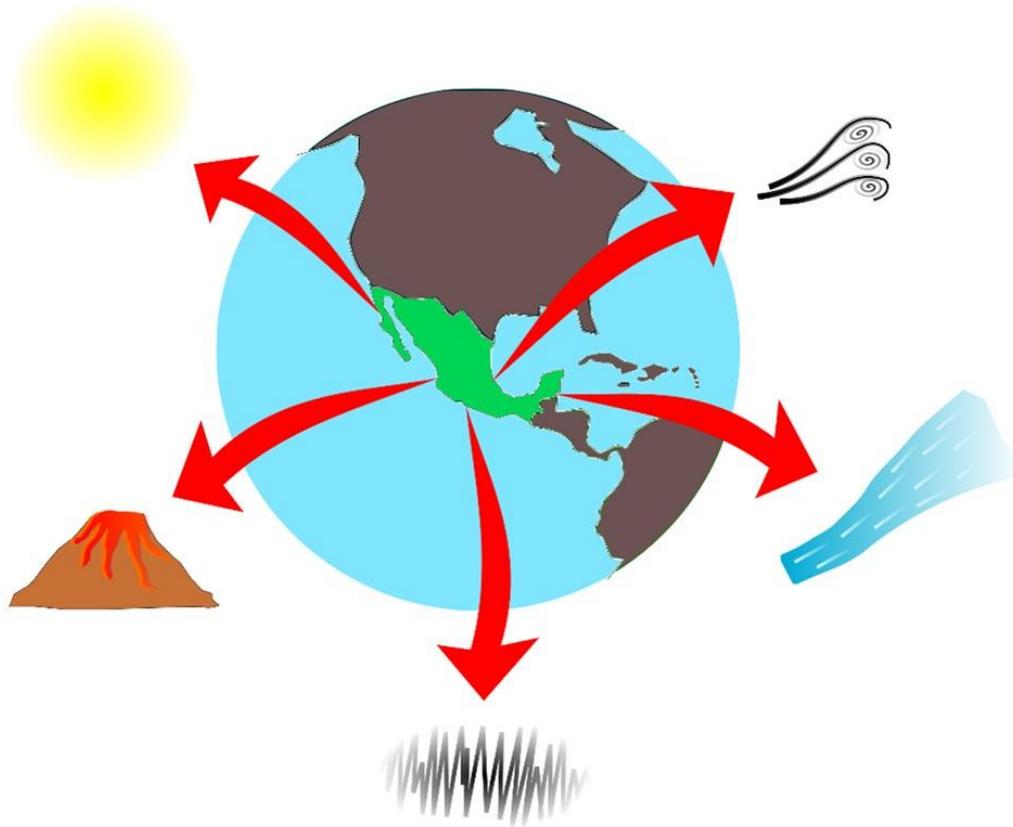
## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

emisiones de gases de efecto invernadero y la explotación de recursos que son consecuencias directas de generación de energía eléctrica convencional (Attanayake et al., 2024). El efecto invernadero es un fenómeno que ocurre de forma natural en la atmósfera de la Tierra y es el responsable de que se haya tenido una temperatura óptima para la existencia de la vida, sin este fenómeno la temperatura promedio de la Tierra estaría por debajo de los 0°C. Sin embargo, los gases provenientes del procesamiento de los combustibles fósiles, la deforestación de bosques y selvas, en conjunto con toda la actividad humana, han intensificado el efecto invernadero provocando un aumento de la temperatura perjudicial para los seres vivos, que se puede ver reflejado en el cambio climático (Osman et al., 2023). Las consecuencias de este fenómeno involucran una alteración en las corrientes oceánicas y la

intensidad del viento, aumento o disminución de las precipitaciones, aumento en el nivel del mar, desaparición de glaciares, y variabilidad en la intensidad y/o periodicidad de diversos fenómenos meteorológicos.

México tiene una localización geográfica idónea para el aprovechamiento de los diferentes tipos de energías limpias (Figura 1). A pesar de que nuestro país lleva algunos años explotando estos tipos de fuentes de energía, aún existe una capacidad alta de generación que puede ser aprovechada (Castrejon-Campos, 2022; Cruz Ake et al., 2024). A continuación, se mencionan algunos aspectos generales a considerar con respecto a las energías limpias que ya son recolectadas en territorio mexicano, y de las fuentes de energía que también pueden ser aprovechadas.





## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

**Figura 1.** Energías limpias disponibles en México y el mundo.

### 3.1 Energía solar

La energía solar se puede aprovechar de dos formas principales (Pourasli et al., 2023); a través del efecto fotovoltaico en el que se utilizan celdas solares (transductores) para convertir la energía de los fotones provenientes del sol (fuente de energía limpia) en energía eléctrica; y la segunda a través del efecto térmico de la radiación solar la cual se utiliza entre otras cosas para calentar agua (u otro elemento al que se necesite elevar su temperatura) mediante colectores solares ópticos.

El potencial de energía solar en México es uno de los más grandes a nivel mundial (López-Flores et al., 2024), esto debido a que México se encuentra en una región geográfica llamada cinturón solar donde la radiación se encuentra por encima de la media global. A pesar de que la energía solar está siendo aprovechada en todo el mundo, muchos países están lejos de la capacidad de captación de energía solar que tiene México. La capacidad de generación de energía fotovoltaica aún está lejos de alcanzar el potencial real del país, por lo que el área de oportunidad para aumentar significativamente la recolección de este tipo de energía es alta.

### 3.2 Energía eólica

El viento es una fuente de energía que se ha utilizado desde tiempos antiguos, su uso ha ido revolucionando a través del tiempo; en los últimos años este recurso se ha utilizado para generar energía eléctrica mediante aerogeneradores. La energía eólica es inagotable y limpia, es decir, no produce gases de efecto invernadero, y con esta ventaja se contribuye con el medio ambiente. La energía eólica se produce mediante la energía cinética del viento para crear el movimiento de un generador eléctrico (transductor) para que a través de un fenómeno de inducción electromagnética permita la producción de energía eléctrica (Summerfield-Ryan & Park, 2023). Para encontrar sitios con buen potencial eólico se debe realizar un estudio que abarque los tipos de ecosistema y tipos de terreno, cabe mencionar

que el viento se comporta de diferente manera en zonas con planicie, en el mar, zonas con relieves y en zonas urbanas. A mayor altura la fricción disminuye, lo que permite que el viento fluya más libremente y a mayor velocidad, mientras que a bajas altitudes y a nivel de suelo el viento es más lento y su dirección está influenciada por los obstáculos del terreno. Es importante realizar un estudio de potencial eólico para identificar zonas ideales para instalar aerogeneradores del tipo que se adapte a la zona geográfica; existen dos tipos de aerogeneradores los de eje horizontal que comúnmente se encuentran instalados en parques eólicos e instalados a alturas de más de 100 m y los de eje vertical que están dirigidos principalmente a zonas urbanas en donde el viento circula omnidireccionalmente. La región del Istmo de Tehuantepec es considerada como una de las fuentes de energía eólica más grandes de América Latina. En esta región se encuentran las instalaciones *on-shore* (término utilizado para instalaciones eólicas en tierra) más grandes del país (García-Caballero et al., 2023). A pesar de que la energía eólica *on-shore* representa un potencial alto para la generación de energía eléctrica, el potencial de generación de energía eólica *off-shore* (instalaciones eólicas situadas en el mar) es aún más interesante. México tiene una posición geográfica con extensas costas de lado del océano pacífico y el golfo de México que lo hacen idóneo para la instalación de generadores eólicos tipo *off-shore*, lo cual hasta el momento sigue sin aprovecharse.

### 3.3 Energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica aprovecha la fuerza del agua (fuente de energía limpia) para mover turbinas (transductores similares a los generadores eléctricos de la energía eólica) que producen energía eléctrica en cada giro. México ha sido pionero en este tipo de energía renovable (Aleman-Nava et al., 2014), en la actualidad la energía hidroeléctrica continúa siendo la mayor fuente de energía renovable del país. En relación con este tipo de energía, aunque no se han realizado estimaciones del



## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

potencial real del país, se han detectado alrededor de un centenar de lugares con alto potencial para la generación de energía y los cuales al momento siguen sin ser aprovechadas.

### 3.4 Energía geotérmica

En este caso se aprovecha el calor del centro de la tierra (fuente de energía limpia) que se transmite hacia la superficie a través de diferentes fenómenos. En relación con la energía geotérmica, México es uno de los países con mayor capacidad de generación debido a su localización geográfica perteneciente al cinturón de fuego, una zona geográfica con uno de los más importantes registros de actividad volcánica. A pesar de que México es pionero en la utilización de este tipo de energía renovable, el alcance de generación de energía eléctrica a través de este tipo de energía aún resulta desconocido ya que es necesaria la realización de más estudios para la exploración de nuevas fuentes geotérmicas, sin embargo, es clara la importancia de aprovechar este tipo de fuente de energía.

### 3.5 Energía de biomasa

La biomasa se puede aprovechar principalmente de dos formas (McKendry, 2002): mediante procesos termoquímicos, como la combustión directa, en los que la materia orgánica se convierte en calor, gases combustibles o biocarbón; y a través de procesos bioquímicos, como la fermentación y la digestión anaerobia, en los que microorganismos transforman compuestos orgánicos en biogás o biocombustibles. En ambos casos, el recurso primario proviene de residuos agrícolas, forestales, industriales o urbanos, así como de cultivos dedicados a la obtención de biomasa, constituyendo una fuente de energía renovable que contribuye a reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero.

En México, el potencial de generación de energía a partir de biomasa es considerable (Masera & Rivero, 2022; Reyes-Santiago et al., 2024), especialmente por la gran disponibilidad de residuos agrícolas como bagazo de caña, rastrojo

de maíz y cascarilla de café, así como de residuos orgánicos urbanos. Sin embargo, la capacidad instalada para su aprovechamiento todavía es reducida en comparación con el potencial estimado, lo que representa un área de oportunidad importante para el desarrollo de tecnologías más eficientes, el impulso de proyectos de generación distribuida y la diversificación de la matriz energética nacional (Icaza-Alvarez et al., 2023).

### 3.6 Energía mareomotriz y undimotriz

La energía mareomotriz y la undimotriz, clasificadas como energías renovables, se basan en el aprovechamiento de la energía mecánica producida por las mareas y el oleaje, respectivamente, a través de generadores eléctricos y elementos piezoeléctricos (transductores). En México, el potencial de generación eléctrica con este tipo de energía renovable se estima a ser similar al de las energías eólica y solar (Hernández-Fontes et al., 2019). Es necesario mencionar, que la tecnología para aprovechar eficientemente este tipo de energía aún se encuentra en investigación por lo que existe un área de oportunidad real para el desarrollo científico e industrial.

## 4. Energía no convencional

Las vibraciones mecánicas son un tipo de fenómeno y fuente de energía que se presenta de manera natural en el ambiente. Sin embargo, la actividad humana ha generado una gran cantidad de nuevas fuentes de vibración mecánica desde comienzos de la revolución industrial. Las principales fuentes de energía vibracional que han sido estudiadas para la recolección de energía son flujos de aire y agua, movimiento corporal y vibraciones en infraestructura causados por la actividad humana.

La actividad humana en las ciudades ha generado una gran cantidad de energía que tiene el potencial para la generación de energía eléctrica. Adicionalmente, la necesidad de instrumentos electrónicos para el monitoreo de las condiciones estructurales, señalizaciones, y



## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

otro tipo de dispositivos electrónicos útiles en la infraestructura urbana han incentivado la investigación de técnicas para la recolección de este tipo de energía. La vibración generada en edificios, vialidades y puentes debido a la interacción que esta infraestructura tiene con el viento, el movimiento vehicular y el tráfico de personas, tiene un potencial alto para la generación energía eléctrica. Los edificios pueden presentar vibraciones de gran magnitud. En este caso se han probado diferentes materiales piezoeléctricos en diferentes configuraciones con la finalidad de convertir las deformaciones mecánicas, provocadas por el viento, movimientos telúricos (Xie et al., 2015) y el tráfico peatonal (Hwang et al., 2015; Li & Strezov, 2014), en energía eléctrica.

La energía mecánica ejercida sobre las calles, carreteras y otro tipo de vialidades tiene el potencial para suministrar energía eléctrica a señalizaciones de tráfico, el monitoreo de las condiciones estructurales de las vialidades, monitores de velocidad y peso de los vehículos (Sezer & Koç, 2021). Las vibraciones mecánicas producidas por el paso del tráfico vehicular han mostrado un alto potencial para la generación de energía eléctrica por medio de materiales piezoeléctricos (Li et al., 2018; Song et al., 2016; Yang et al., 2021). Además de las vibraciones causadas por el tráfico vehicular, también se ha investigado el potencial de vibración generado en las vías por la circulación de trenes (Bosso et al., 2020).

Las vibraciones producidas en puentes por el tráfico peatonal y vehicular han sido utilizadas para generar energía eléctrica por medio de recolectores piezoeléctricos cerámicos y poliméricos (Karimi et al., 2016; Sheng et al., 2022; Wang et al., 2018; Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2022). La energía obtenida ha sido utilizada principalmente para iluminación y el monitoreo de las condiciones estructurales del puente (Sezer & Koç, 2021). La mayor cantidad de sistemas de recolección de energía producida por vibraciones están centradas en la utilización de materiales piezoeléctricos.

México, como un país urbanizado y con ciudades de alta densidad demográfica, debería aprovechar la cantidad de energía vibracional disponible, lo cual, además de crear un beneficio propio en el uso de energías limpias, lo pondrían a la vanguardia en la implementación de tecnologías compatibles con infraestructura 4.0 e infraestructura inteligente, tecnologías que en los últimos años se han desarrollado exponencialmente.

### 5. Conclusiones

La zona geográfica en la que se localiza el país, le ha conferido un potencial inigualable para la recolección de energías limpias. Es necesario mencionar que es este mismo hecho el que le confiere a México la diversidad de climas, flora y fauna que tiene el deber preservar. Es evidente que estos factores pondrán a México como uno de los países con mayor potencial de inversión de capital y recursos humanos para la transición energética que permita el uso de energías limpias por encima de otro tipo de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles. Finalmente podemos mencionar que México representa una oportunidad inigualable para la mejora de las tecnologías existentes para la explotación de energías verdes, pero también para la investigación científica e implementación de nuevas fuentes de energías limpias a través de métodos de recolección de energía.

### Declaraciones y afirmaciones

**Fondos:** Este trabajo fue realizado bajo financiamiento del Tecnológico Nacional de México.

**Conflicto de interés:** Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

**Aprobación de ética:** No aplica.

### Referencias

1. Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlet, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J. F., & Parra, R. (2014). Renewable energy research



## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

- progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140–153. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.01.004>
2. Attanayake, K., Wickramage, I., Samarasinghe, U., Ranmini, Y., Ehalapitiya, S., Jayathilaka, R., & Yapa, S. (2024). Renewable energy as a solution to climate change: Insights from a comprehensive study across nations. *PLOS ONE*, 19(6), e0299807. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0299807>
  3. Bosso, N., Magelli, M., & Zampieri, N. (2020). Application of low-power energy harvesting solutions in the railway field: a review. *https://Doi.Org/10.1080/00423114.2020.1726973*, 59(6), 841–871. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1726973>
  4. Castrejon-Campos, O. (2022). Evolution of clean energy technologies in Mexico: A multi-perspective analysis. *Energy for Sustainable Development*, 67, 29–53. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2022.01.003>
  5. Cruz Ake, S., Ortiz Arango, F., & García Ruiz, R. S. (2024). Possible paths for Mexico's electricity system in the clean energy transition. *Utilities Policy*, 87, 101716. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2024.101716>
  6. Ding, G., Zhao, X., Wang, J., & Xu, C. (2018). Vibration energy harvesting from roads under traffic loads. *https://Doi.Org/10.1080/14680629.2018.1527719*, 21(3), 780–799. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1527719>
  7. García-Caballero, E., Appendini, C. M., Figueroa-Espinoza, B., Allende-Arandía, M. E., Magar, V., & Gross, M. S. (2023). Wind energy potential assessment for Mexico's Yucatecan Shelf. *Energy for Sustainable Development*, 74, 415–429. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2023.04.016>
  8. Hernández-Fontes, J. V., Felix, A., Mendoza, E., Cueto, Y. R., & Silva, R. (2019). On the Marine Energy Resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering 2019, Vol. 7, Page 191, 7(6), 191*. <https://doi.org/10.3390/JMSE7060191>
  9. Hwang, S. J., Jung, H. J., Kim, J. H., Ahn, J. H., Song, D., Song, Y., Lee, H. L., Moon, S. P., Park, H., & Sung, T. H. (2015). Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps. *Current Applied Physics*, 15(6), 669–674. <https://doi.org/10.1016/J.CAP.2015.02.009>
  10. Icaza-Alvarez, D., Galan-Hernandez, N. D., Orozco-Guillen, E. E., & Jurado, F. (2023). Smart Energy Planning in the Midst of a Technological and Political Change towards a 100% Renewable System in Mexico by 2050. *Energies*, 16(20), 7121. <https://doi.org/10.3390/EN16207121/S1>
  11. Karimi, M., Karimi, A. H., Tikani, R., & Ziaei-Rad, S. (2016). Experimental and theoretical investigations on piezoelectric-based energy harvesting from bridge vibrations under travelling vehicles. *International Journal of Mechanical Sciences*, 119, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2016.09.029>
  12. Kütt, L., Millar, J., Karttunen, A., Lehtonen, M., & Karppinen, M. (2018). Thermoelectric applications for energy harvesting in domestic applications and micro-production units. Part I: Thermoelectric concepts, domestic boilers and biomass stoves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 519–544. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.03.051>
  13. Li, R., Yu, Y., Zhou, B., Guo, Q., Li, M., & Pei, J. (2018). Harvesting energy from pavement based on piezoelectric effects: Fabrication and electric properties of piezoelectric vibrator. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*,



## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

- 10(5), 054701.  
<https://doi.org/10.1063/1.5002731>
14. Li, X., & Strezov, V. (2014). Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building. *Energy Conversion and Management*, 85, 435–442.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.05.096>
15. Liu, Y., Shang, S., Mo, S., Wang, P., & Wang, H. (2020). Eco-friendly Strategies for the Material and Fabrication of Wearable Sensors. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 2020* 8:4, 8(4), 1323–1346.  
<https://doi.org/10.1007/S40684-020-00285-5>
16. López-Flores, F. J., Ramírez-Márquez, C., Rubio-Castro, E., & Ponce-Ortega, J. M. (2024). Solar photovoltaic panel production in Mexico: A novel machine learning approach. *Environmental Research*, 246, 118047.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.118047>
17. Masera, O., & Rivero, J. C. S. (2022). Promoting a Sustainable Energy Transition in Mexico: the Role of Solid Biofuels. *Bioenergy Research*, 15(4), 1691–1693.  
<https://doi.org/10.1007/S12155-022-10540-Z/METRICS>
18. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46.  
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
19. Osman, A. I., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 741–764.  
<https://doi.org/10.1007/S10311-022-01532-8/METRICS>
20. Pourasl, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports*, 10, 3474–3493.  
<https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.10.022>
21. Pradeesh, E. L., Udhayakumar, S., Vasundhara, M. G., & Kalavathi, G. K. (2022). A review on piezoelectric energy harvesting. *Microsystem Technologies*, 28(8), 1797–1830.  
<https://doi.org/10.1007/S00542-022-05334-4/FIGURES/8>
22. Reyes-Santiago, M. del R., Maruri Montes de Oca, A. E., Olalde Portugal, V., & Hernández-Rosales, M. (2024). Adaptive capability and socioecological traps: a bioenergy case in communities of Irapuato, Guanajuato, Mexico. *Energy, Sustainability and Society*, 14(1).  
<https://doi.org/10.1186/S13705-024-00445-4>
23. Sezer, N., & Koç, M. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*, 80, 105567.  
<https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2020.105567>
24. Sheng, W., Xiang, H., Zhang, Z., & Yuan, X. (2022). High-efficiency piezoelectric energy harvester for vehicle-induced bridge vibrations: Theory and experiment. *Composite Structures*, 299, 116040.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116040>
25. Song, Y., Yang, C. H., Hong, S. K., Hwang, S. J., Kim, J. H., Choi, J. Y., Ryu, S. K., & Sung, T. H. (2016). Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(29), 12563–12568.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.149>
26. Summerfield-Ryan, O., & Park, S. (2023). The power of wind: The global wind energy industry's successes and failures. *Ecological*



## Artículo de divulgación científica

Hernández-Rivera et al., 2025

*Economics*, 210, 107841.  
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2023.107841>

27. Wang, H., Jasim, A., & Chen, X. (2018). Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review. *Applied Energy*, 212, 1083–1094.  
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.12.125>
28. Xie, X. D., Wang, Q., & Wang, S. J. (2015). Energy harvesting from high-rise buildings by a piezoelectric harvester device. *Energy*, 93, 1345–1352.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.09.131>
29. Yang, H., Wei, Y., Zhang, W., Ai, Y., Ye, Z., & Wang, L. (2021). Development of Piezoelectric Energy Harvester System through Optimizing Multiple Structural Parameters. *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 2876, 21(8), 2876.  
<https://doi.org/10.3390/S21082876>
30. Zhang, Y., Cai, S. C. S., & Deng, L. (2014). Piezoelectric-based energy harvesting in bridge systems. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(12), 1414–1428.  
<https://doi.org/10.1177/1045389X13507354>
31. Zhang, Z., Xiang, H., Tang, L., & Yang, W. (2022). A comprehensive analysis of piezoelectric energy harvesting from bridge vibrations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(1), 014001.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/AC9F21>