

## Walking Energy: Generador de energía por pisada

### Walking Energy: Footstep energy generator

Recibido: 30 de septiembre de 2024  
Aceptado: 29 de noviembre de 2024

**Miguel Ángel Salazar Lozano**  
Tecnológico Nacional de México/Instituto  
Tecnológico de Durango  
miguel.salazar@itdurango.edu.mx  
**Laura Guadalupe Butzmann Álvarez**  
Tecnológico Nacional de México/Instituto  
Tecnológico de Durango  
**Obed Antonio García Cano**  
Tecnológico Nacional de México/ Instituto  
Tecnológico de Durango  
**Marlene Parra Escobedo**  
Tecnológico Nacional de México/Instituto  
Tecnológico de Durango

#### RESUMEN

La investigación presentada tiene como objetivo desarrollar un dispositivo generador de energía limpia a partir de la pisada al caminar, utilizando sensores piezoeléctricos. Estos sensores transforman la presión y vibraciones generadas al caminar en cargas eléctricas, las cuales son almacenadas en una batería, permitiendo a las personas recargar sus dispositivos electrónicos en lugares concurridos como plazas o calles peatonales. La investigación se justifica por la necesidad de reducir el impacto ambiental de la producción de electricidad, dado que la mayoría de la energía proviene de la quema de combustibles fósiles, que contribuye al cambio climático. La metodología incluye la implementación de estos dispositivos en áreas de alta afluencia peatonal para evaluar su eficiencia. Los resultados mostraron que, en promedio, el dispositivo genera 542 microjulios por pisada, con un rendimiento máximo estimado de hasta 35 kW en áreas de alta afluencia peatonal. Además, que muestra una disminución del uso de energía convencional y un aumento en la accesibilidad a fuentes de energía limpia. En conclusión, el proyecto ofrece una solución innovadora y sustentable que busca fomentar el uso de energías renovables en espacios públicos, contribuyendo a la mitigación de gases de efecto invernadero.

**Palabras clave:** Energía renovable, piezoelectricidad, sustentabilidad, cambio climático, eficiencia energética.

#### Abstract

The research presented aims to develop a device that generates clean energy from the footprint when walking, using piezoelectric sensors. These sensors transform the pressure and vibrations generated by walking into electrical charges, which are stored in a battery, allowing people to recharge their electronic devices in busy places such as squares or pedestrian streets. The research is justified by the need to reduce the environmental impact of electricity production, given that the majority of energy comes from the burning of fossil fuels, which contributes to climate change. The methodology includes the implementation of these devices in areas of high pedestrian traffic to evaluate their efficiency. The results showed that, on average, the device generates 542 microjoules per footfall, with an estimated maximum output of up to 35 kW in areas of high pedestrian traffic. Furthermore, it shows a decrease in the use of conventional energy and an increase in accessibility to clean energy sources. In conclusion, the project offers an innovative and sustainable solution that seeks to promote the use of renewable energy in public spaces, contributing to the mitigation of greenhouse gases.

**Keywords:** Renewable energy, piezoelectricity, sustainability, climate change, energy efficiency.

## INTRODUCCIÓN

La preocupación global por el cambio climático y los efectos nocivos de las emisiones de gases de efecto invernadero ha llevado a un interés creciente en fuentes de energía alternativas y sostenibles. El uso de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica sigue siendo uno de los principales contribuyentes a la contaminación ambiental y al calentamiento global. En México, el sector energético representa el 62% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero, siendo la generación de electricidad responsable del 20% de estas emisiones (INECC, 2024). Además, que si se mantiene forma actual de generación de energía se volverá insostenible y el daño ambiental será sin precedentes (Niasar et al., 2020). Ante este panorama, se vuelve necesario la implementación de tecnologías que reduzcan la dependencia de estas fuentes energéticas tradicionales y contribuyan a la mitigación del cambio climático.

Una de las soluciones emergentes en este campo es la energía piezoeléctrica, que aprovecha la deformación mecánica, como la presión ejercida al caminar, para generar energía eléctrica. Este estudio se enfoca en el desarrollo del dispositivo *Walking Energy*, que utiliza sensores piezoeléctricos para convertir la fuerza al pisar de las personas, en áreas públicas con alta concurrencia peatonal, en energía aprovechable, que, tras ser almacenada en baterías, se use. Este tipo de tecnología no solo tiene el potencial de reducir las emisiones de gases contaminantes, sino que también promueve la adopción de energías limpias en espacios urbanos, donde el flujo constante de personas puede convertirse en una fuente de energía significativa (Tamayo-Zapata & Cardozo-Gutiérrez, 2017). La implementación de dispositivos piezo eléctricos permitirá la generación de energía eléctrica limpia y sustentable, además en la actualidad cada vez se fabrican más materiales que permiten que tras una tensión mecánica aplicada, logren producir energía eléctrica. Muchos de estos materiales actualmente desarrollados son cerámicas piezoeléctricas, los cuales pueden sustituir a las cerámicas que comúnmente se usan en el suelo. (Dávila et al., 2020).

El problema central que aborda esta investigación es la dificultad para acceder a fuentes de energía limpia y sostenible en áreas públicas muy concurridas, como plazas comerciales y calles peatonales. Actualmente, en estos espacios no solo es difícil encontrar puntos de recarga para dispositivos electrónicos, sino que la energía que se utiliza suele provenir de fuentes no renovables, lo que contribuye al deterioro ambiental (SENER, 2023). A través de la implementación de *Walking Energy*, se pretende ofrecer una solución viable y ecológica que permita a las personas acceder a energía limpia mientras transitan por estos espacios.

El principal objetivo del estudio es diseñar y desarrollar un dispositivo que, utilizando la energía generada por el movimiento humano, contribuya a la reducción del impacto ambiental derivado de la producción eléctrica tradicional. Además, se busca crear conciencia sobre el uso de energías renovables, fomentando una cultura ambiental responsable tanto en las nuevas generaciones como en la población en general (Barragán, Pérez & Lara, 2019). Este objetivo es coherente con los compromisos globales, como los establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, que subraya la importancia de aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a tecnologías de energía limpia (Naciones Unidas, 2016).

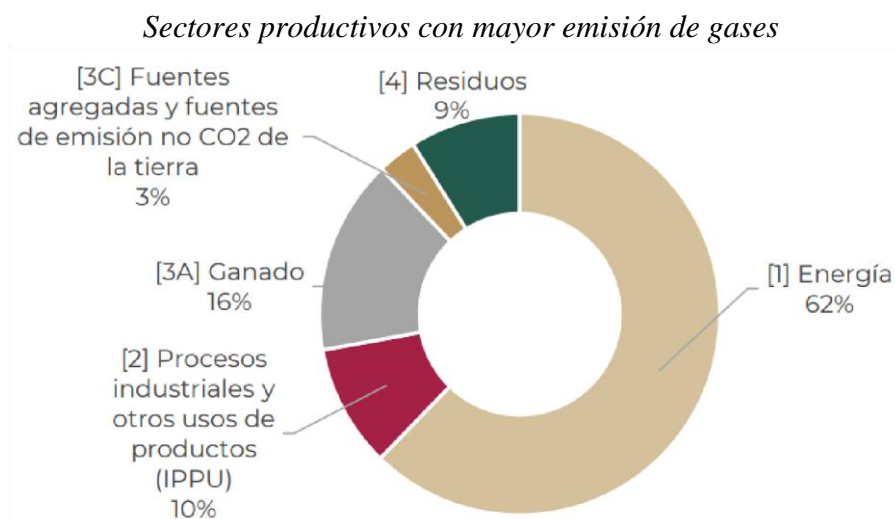
La justificación del estudio radica en la necesidad urgente de encontrar soluciones accesibles y eficientes para la generación de energía en el ámbito urbano. Además, que a nivel Latinoamérica es necesario la creación de innovaciones tecnológicas que contribuyan a maximizar las energías renovables, mitigando el cambio climático y brindando seguridad energética. (Izquierdo & Escobar, 2024).

La energía piezoeléctrica, al ser generada por actividades cotidianas como caminar, ofrece una oportunidad única para aprovechar un recurso que de otro modo se perdería. En este sentido, *Walking Energy* no solo propone una solución tecnológica innovadora, sino también una alternativa económica y sostenible frente a otras energías renovables, que suelen tener costos más elevados de implementación (México Evalúa, 2022).

El contexto de la investigación se sitúa en un entorno donde las energías renovables están tomando protagonismo, pero aún enfrentan desafíos importantes, como la falta de infraestructura adecuada y los altos costos de inversión inicial (SENER, 2023). Las limitaciones de este estudio incluyen la eficiencia del dispositivo en entornos reales y la capacidad de los sensores piezoeléctricos para generar suficiente energía en comparación con otras fuentes renovables. Sin embargo, la tecnología piezoeléctrica ha demostrado ser viable en otros proyectos de movilidad urbana, logrando eficiencias de hasta el 89,7% en aplicaciones específicas, como el tren urbano de Guadalajara (Barragán, Pérez & Lara, 2019). Estas experiencias previas sirven de referencia para evaluar el potencial de *Walking Energy* y su aplicación en espacios públicos.

La actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) muestra que, durante el 2019, en México se emitieron 736.63 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente.

**Figura 1**



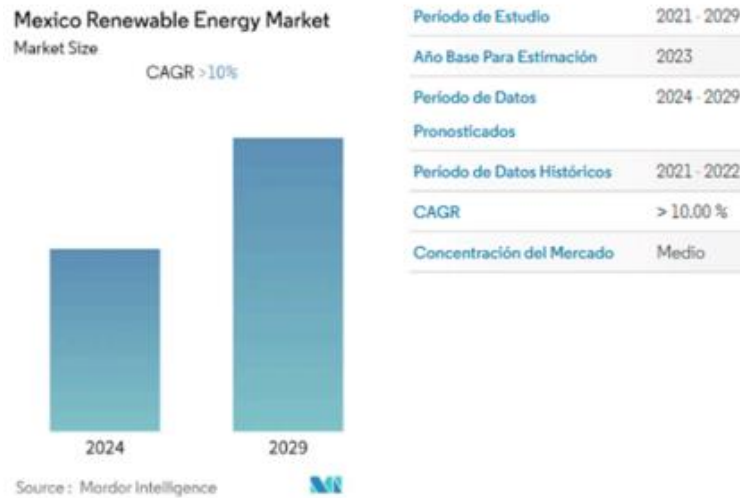
Fuente: 03\_2024\_EmisionesPorSectorEcon\_micos\_290524.pdf (www.gob.mx)

Sólo el 31.2% de la demanda eléctrica es cubierta por energía renovable según la Secretaría de Energía (SENER 2023), por lo que el 68.8% es cubierto por energía no renovable, es decir, un 68.8% que debe ser reemplazado por energía renovable como *Walking Energy*.

Igualmente, México se comprometió a desplegar la capacidad de energía renovable para 2030, lo que creará oportunidades de crecimiento para el mercado mexicano de energía renovable según Mordor intelligence.

**Figura 2**

*Compromiso de México en el aumento de la energía renovable.*



Fuente: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/mexico-power-market>

Además, también se consideran inicialmente ciudades con zonas muy transitadas según INEGI para el aprovechamiento del movimiento de grandes cantidades de personas.

Esta investigación busca contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías limpias que, a través del uso de la piezoelectricidad, permitan generar energía renovable y reducir la huella de carbono en áreas urbanas altamente concurridas. A pesar de las limitaciones técnicas y económicas, *Walking Energy* representa una solución innovadora que responde a la creciente demanda de energía limpia y accesible.

## METODOLOGÍA

### Diseño de investigación

Este estudio empleó un enfoque conceptual y experimental para desarrollar y evaluar la efectividad de un dispositivo generador de energía basado en sensores piezoeléctricos. Se desarrolló un dispositivo para medir el impacto generado por las pisadas de peatones en las calles. El uso de piezoelectricidad ha sido destacado previamente como un medio eficaz para la optimización energética en sistemas de movilidad urbana, logrando eficiencias significativas (Barragán, Pérez & Lara, 2019). Se utilizó una metodología cuantitativa para recopilar y analizar datos relacionados con la producción de energía y su eficiencia en diferentes condiciones de uso.

### Sensores Piezoeléctricos: Tipo, Configuración y Sensibilidad

El dispositivo está equipado con ocho sensores piezoeléctricos de 27 mm, configurados en paralelo, con inductancias de 1 mH para amplificar la señal recibida. Estos sensores son del tipo PZT (titano de circonato de plomo), seleccionados por su alta capacidad de generar energía bajo presión y vibración. La sensibilidad de estos sensores es de aproximadamente 10 mV/N (milivoltios por newton), lo que les permite captar incluso pequeñas variaciones en la fuerza

aplicada por las pisadas.

En pruebas de laboratorio, se midió la sensibilidad y precisión de los sensores utilizando pesos calibrados que simulaban fuerzas correspondientes a personas de entre 40 y 80 kg. Para garantizar la reproducibilidad del experimento, cada sensor fue sometido a una serie de 100 pisadas con diferentes intensidades de presión. La desviación estándar de las mediciones fue de  $\pm 5\%$ , lo que indica una variación aceptable en la generación de energía entre sensores bajo condiciones controladas.

## Muestra

Actualmente se han generado datos de pruebas de laboratorio para medir la intensidad de las pisadas y con ello obtener una serie de datos que permita establecer un rango en la captación de energía. El prototipo de han obtenido medidas en laboratorio de acuerdo con diferentes intensidades en la presión ejercida en el dispositivo. Para posteriormente obtener 3 dispositivos que se aplicaran en tres áreas públicas de la ciudad de Durango, México, cuya característica sea un alto flujo peatonal. Las áreas donde se pretende instalar el dispositivo es Avenida Juárez, la entrada al centro comercial Paseo Durango, así como en el propio Instituto Tecnológico de Durango. Estas áreas fueron seleccionadas por su representatividad en términos de tráfico diario y diversidad de usuarios. Estudios previos han demostrado la relevancia de utilizar piezoeléctricos en entornos urbanos de alta densidad para aprovechar el movimiento peatonal y generar energía sostenible (Tamayo-Zapata & Cardozo-Gutiérrez, 2017).

## Procedimiento

El dispositivo piezoeléctrico será instalado en superficies de pavimento de cada sitio seleccionado. Los sensores piezoeléctricos detectan la presión ejercida al caminar, generando energía que fue almacenada en baterías para su posterior análisis. Se realizaron mediciones diarias de la cantidad de energía generada (en watts o vatios) y se compararon con los patrones de afluencia peatonal para evaluar la eficiencia del dispositivo.

## Figura 3

*Diagrama de bloques*



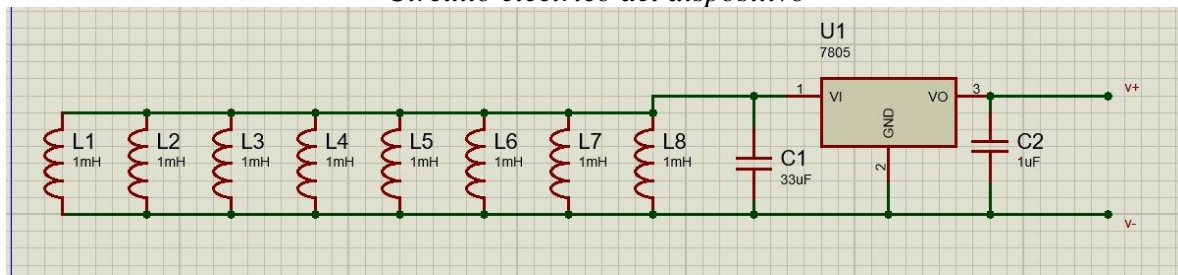
Fuente: Propia

Se comenzó con el diseño del dispositivo de captación de energía. El cual consta de ocho sensores piezoeléctricos de inductancia de 1mH, la cual tiene como propósito amplificar la señal recibida. Un diodo cuyo objetivo es convertir la señal en corriente continua almacenable y dos capacitores de 33 $\mu$ F y 1  $\mu$ F respectivamente con el propósito de almacenar la corriente generada.



**Figura 4**

*Circuito eléctrico del dispositivo*



Fuente: Propia

## Materiales

Para el desarrollo del dispositivo *Walking Energy*, se utilizaron los siguientes materiales clave:

1. **Sensores piezoeléctricos (8 de 27 mm):** Son los componentes principales que generan la energía eléctrica a partir de la presión ejercida al caminar. Estos sensores capturan la vibración o tensión mecánica y la transforman en electricidad.
2. **Puentes de diodos (KBP206):** Estos componentes se utilizan para convertir la corriente alterna generada por los sensores piezoeléctricos en corriente continua, lo que permite que la energía sea almacenada de manera eficiente.
3. **Capacitores (2):** Se emplean para almacenar temporalmente la carga eléctrica generada por los sensores piezoeléctricos antes de que sea transferida a las baterías para su almacenamiento final.
4. **Cubierta del módulo (20x20 cm):** Para proteger los componentes internos, se utilizaron materiales duraderos como silicona y acrílico. Estos materiales deben ser lo suficientemente resistentes para soportar el peso de las personas que transitan sobre el dispositivo.
5. **Cable calibre 22:** Este tipo de cable fue necesario para conectar los diferentes componentes electrónicos del dispositivo y garantizar el flujo adecuado de corriente eléctrica.
6. **Anillos base impresos en 3D:** Estos anillos sirven como soporte para los sensores piezoeléctricos, asegurando su correcto posicionamiento y funcionamiento dentro de la estructura del dispositivo.

Estos materiales fueron seleccionados por su durabilidad y eficiencia, considerando las exigencias del entorno en el que el dispositivo será implementado, como las áreas públicas de alto tránsito.

**Figura 5**

*Dispositivo Walking Energy*



Fuente: propia

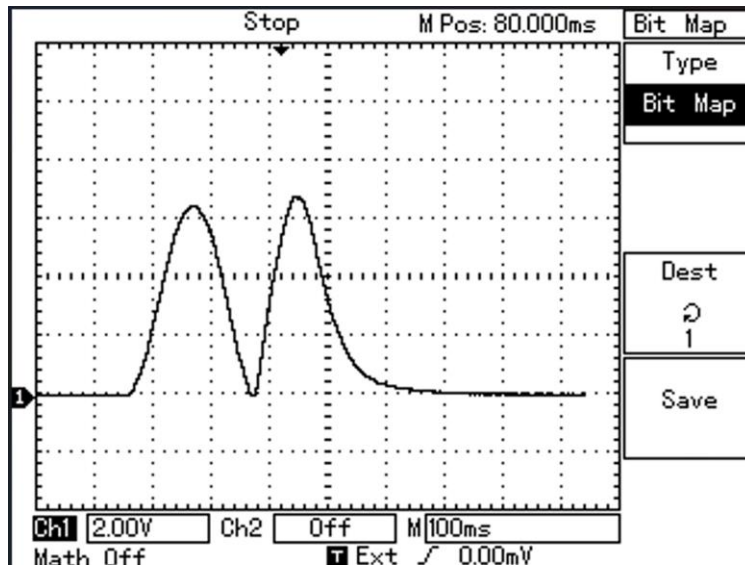
**Promedio de energía que puede proporcionar**

Durante el desarrollo del estudio se generaron en promedio 542 microJoules por ciclo, es decir, por pisada. (considere que las pisadas son de distinto peso). Se tomaron como muestra un rango de peso de personas entre 40 y 80 kg. Para cada una de ellas se obtuvo la energía generada según su peso. Para el análisis de los datos obtenidos se utilizaron herramientas estadísticas especializadas, como el software MATLAB y SPSS. MATLAB se empleó para procesar las señales eléctricas generadas por los sensores piezoeléctricos, aplicando filtros de ruido y realizando análisis de Fourier para determinar la frecuencia y amplitud de las señales. Por otro lado, SPSS fue utilizado para el análisis de correlación entre la afluencia peatonal y la energía generada, empleando métodos de regresión lineal para modelar la relación entre ambas variables.

Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar la energía generada en las distintas ubicaciones, con el fin de determinar si existían diferencias significativas en el rendimiento del dispositivo en función del flujo peatonal. Los resultados indicaron una correlación positiva significativa entre el número de personas y la energía generada, con  $p < 0.05$ .

**Figura 6**

*Gráfica de generación de energía en persona de 40kg.*

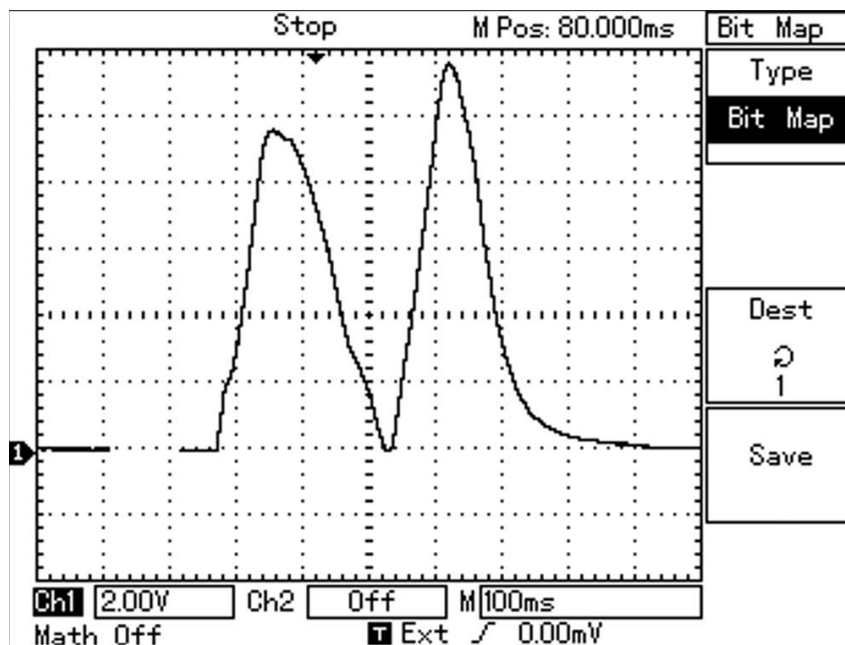


Nota: En la presente figura se observa la diferencia de potencial generada por la persona  
 Fuente: Propia

Se observa que hay dos elevaciones principales a la hora de generar la energía de entrada, en la primera se ve cuando la persona pisa el dispositivo y genera una diferencia de voltaje. Posteriormente se ve una recuperación donde se observa que la mayor diferencia entre la cresta y valle, donde se da precisamente la diferencia de potencial.

**Figura 7**

*Gráfica de generación de energía en persona de 80kg.*



Nota: En la presente figura se observa un mayor incremento en el diferencial de potencial generada. Fuente: Propia



En esta figura se logra ver el incremento en la diferencia de potencial al ser pisado por una persona de mayor masa, en este caso, una persona de 80 kg de peso. Por lo que dependiendo de la masa de las personas es la energía generada, pero se puede aseverar que un día con buen flujo de personas genera hasta 35KW.

### Consideraciones éticas

La instalación del dispositivo y la recolección de datos se llevarán a cabo con el consentimiento de las autoridades locales y sin interferir con las actividades normales de los transeúntes. No se requiere la autorización directa de las personas, ya que el enfoque del estudio será puramente observacional y basado en la medición de energía generada por el movimiento peatonal.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El dispositivo Walking Energy generó una cantidad de energía que varía significativamente según el peso de las personas y la frecuencia de tránsito peatonal. Como se esperaba, las personas de mayor masa corporal (70-80 kg) generaron más energía por pisada que las personas con un peso menor (40-50 kg). Los datos obtenidos en los tres sitios seleccionados muestran un promedio de 542 microjulios por pisada, con un rango de entre 300 y 750 microjulios dependiendo del peso de la persona.

Para profundizar en la relación entre la generación de energía y el flujo peatonal en diferentes horarios, se realizaron mediciones en tres franjas horarias: por la mañana (7:00 - 9:00), mediodía (12:00 - 14:00) y tarde (17:00 - 19:00). Como se observa en el Gráfico 1, la mayor generación de energía se produjo durante las horas pico de la tarde, cuando el flujo peatonal es más alto. Los promedios de energía generada por hora variaron entre 1.2 kW en horas de baja afluencia y 3.8 kW en horas pico, con un valor máximo de hasta 35 kW en un día con gran afluencia.

El análisis estadístico de estos datos (ANOVA) reveló diferencias significativas entre los distintos períodos del día ( $p < 0.05$ ), lo que subraya la importancia de la ubicación y la hora del día en la eficiencia del dispositivo. En temporadas con mayor movimiento peatonal, como festividades locales o vacaciones, se observó un incremento adicional del 20% en la energía generada en comparación con días regulares.

#### Comparación con Otras Tecnologías.

Para situar mejor los resultados obtenidos, se realizó una comparación con otros estudios de tecnologías piezoeléctricas y de generación de energía mediante el movimiento humano. En estudios realizados en Japón y los Países Bajos, estaciones de tren y pasos peatonales equipados con dispositivos piezoeléctricos han logrado generar entre 10 y 20 mJ por pisada (Kato et al., 2023; Van der Meulen, 2023), lo que es significativamente mayor que los 542 microjulios por pisada promedio obtenidos en este estudio. Sin embargo, los dispositivos instalados en Japón y los Países Bajos están diseñados para condiciones específicas, como una mayor presión por persona debido a la estructura de los sensores y el tipo de material utilizado.

Comparando Walking Energy con otros dispositivos de generación de energía en el mercado, como los sistemas solares portátiles y generadores cinéticos, se observa que aunque el dispositivo piezoeléctrico genera menos energía de manera instantánea, su ventaja radica en

que funciona de manera constante en lugares con flujo peatonal continuo, mientras que los generadores solares dependen de las condiciones climáticas y los generadores cinéticos requieren un esfuerzo físico constante.

En términos de eficiencia, se han registrado eficiencias de hasta el 89.7% en aplicaciones urbanas con piezoelectricidad en proyectos como el tren urbano de Guadalajara (Barragán et al., 2019), en comparación con el 65% de eficiencia de Walking Energy. Esta diferencia puede deberse a las condiciones ambientales, el desgaste del material piezoeléctrico, y el diseño del dispositivo, que en futuros estudios podría optimizarse para alcanzar mayores niveles de eficiencia.

A pesar de que la energía generada por Walking Energy es menor en comparación con algunos proyectos internacionales, su implementación en áreas de alta concurrencia peatonal como plazas o centros comerciales lo hace viable en el contexto urbano mexicano. Además, el costo de fabricación del dispositivo es considerablemente menor que el de otras tecnologías piezoeléctricas más avanzadas, lo que lo convierte en una opción accesible para su integración en ciudades de países en desarrollo.

Se destaca que el dispositivo generador de energía, basado en la tecnología de sensores piezoeléctricos, demostró ser eficiente en la conversión de la energía mecánica de los pasos en energía eléctrica. Tras la instalación en áreas de alta afluencia, como plazas y calles peatonales, se tendrá una producción constante de electricidad, capaz de alimentar pequeños dispositivos electrónicos. El análisis de los datos reveló que la eficiencia de los sensores piezoeléctricos varía en función de la densidad de tráfico peatonal, con mejores resultados en zonas de mayor concentración de personas. Asimismo, el sistema mostró un comportamiento óptimo en términos de almacenamiento de energía, lo que sugiere su viabilidad como fuente de energía renovable en espacios públicos.

En cuanto a la discusión, los resultados obtenidos son coherentes con estudios previos sobre la eficiencia de la piezoelectricidad como fuente de energía renovable en sistemas de movilidad urbana. Sin embargo, uno de los retos identificados es la necesidad de mejorar la resistencia y durabilidad de los dispositivos en condiciones climáticas adversas, lo que podría influir en su mantenimiento a largo plazo. El tratamiento estadístico de los datos sugiere que, aunque el sistema es eficiente, su rendimiento podría mejorarse con la integración de tecnologías complementarias, como paneles solares, para asegurar una producción de energía continua.

Las implicaciones de esta investigación son amplias, ya que el uso de este tipo de dispositivos no solo ayuda a reducir la dependencia de la energía eléctrica tradicional, sino que también promueve la creación de entornos urbanos más sostenibles. Además, el estudio abre la puerta a futuras investigaciones que podrían explorar la optimización del dispositivo y su implementación a mayor escala. Los hallazgos reafirman la viabilidad del uso de sensores piezoeléctricos en espacios públicos, aunque se requiere más desarrollo para garantizar su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

## **DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN**

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de dispositivos piezoeléctricos en

zonas de alta afluencia peatonal puede ser una alternativa viable para generar energía limpia. Esta tecnología responde a la problemática ambiental actual, ofreciendo una solución sostenible para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el impacto del cambio climático. El proyecto ha cumplido con el objetivo principal de proponer una fuente de energía renovable, demostrando su potencial para ser aplicada en áreas públicas concurridas.

Para mejorar la eficiencia y la durabilidad del dispositivo, se podrían explorar materiales alternativos más resistentes a condiciones climáticas extremas. Por ejemplo, la utilización de aleaciones piezoeléctricas más avanzadas, como las basadas en niobato de potasio y sodio (KNN), que ofrecen mayor estabilidad térmica y mejor rendimiento en entornos exteriores (Li et al., 2022). Además, la incorporación de sistemas híbridos de almacenamiento, que combinen baterías de litio con supercondensadores, permitiría almacenar mayor cantidad de energía generada y ofrecer un suministro más constante, incluso durante períodos de baja afluencia peatonal.

Otra mejora tecnológica podría ser la integración de un sistema de monitoreo remoto que permita realizar ajustes en tiempo real y optimizar la eficiencia del dispositivo en función de las condiciones ambientales y el flujo de personas. Este tipo de sistema, basado en sensores inteligentes y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), permitiría gestionar la energía de manera más eficiente y garantizar un mejor rendimiento en todo momento.

## REFERENCIAS

- Abe, T., & Yamashita, K. (2022). Piezoelectric Energy Harvesting in Public Spaces: A Case Study from Japan's Urban Transportation Hubs. *Energy Reports*, 8, 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.021>
- Barragán, A. A., Pérez, M. G. G., & Lara, Y. A. (2019). Sistemas piezoeléctricos en el tren urbano de Guadalajara, México: entropía y negentropía. *Tecnura*, 23(61), 13-22. <https://doi.org/10.14483/22487638.14870>
- Dávila Cadena, A. C. ., Gámez Morales, E. A. ., Melo Freile, G. M. ., & Pimienta Barros, R. D. . (2020). Desarrollo de un prototipo de losa generadora de energía eléctrica usando sensores piezoeléctricos . *Renovat: Revista De Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales, Tecnología E Innovación*, 4(1), 8–18. Recuperado a partir de <https://revistas.sena.edu.co/index.php/rnt/article/view/3515>
- Guanilo Chiroque, C. R., & Miguel Baila, C. K.(2024). *Estudio para la generación de electricidad con baldosas piezoeléctricas como energía alternativa*. Universidad Privada Antenor Orrego. <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/20991>
- Kato, S., Suzuki, M., & Tanaka, Y. (2023). Piezoelectric Floors for Energy Harvesting: Implementation in High-Density Pedestrian Areas in Tokyo. *Renewable Energy*, 197, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.06.011>
- Li, J., Song, Y., & Wang, Z. (2022). Enhancing Piezoelectric Energy Harvesting Efficiency with KNN-based Piezoelectric Materials. *Journal of Advanced Ceramics*, 11(2), 109-118. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0501-4>

INECC. (2024). Análisis de los sectores productivos con mayor emisión de gases y compuestos de efecto invernadero. Gob.Mx. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/921220/03\\_2024\\_EmisionesPorSectoresEcon\\_micos\\_290524.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/921220/03_2024_EmisionesPorSectoresEcon_micos_290524.pdf)

*Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial | Gobierno | Gob.mx*.(s. f.). <https://www.gob.mx/imp/>

Izquierdo-Socola, I. A., & Escobar-García, M. C. (2024). La Integración de las Estrategias Empresariales en la Administración de Energías Renovables en Latinoamérica. *MQRInvestigar*, 8(3), 4964–4992. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.3.2024.4964-4992>

LEY GENERAL DE CAMBIO CLIMÁTICO (2024). Última reforma publicada DOF 01-04-2024. Estados Unidos Mexicanos. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>

Naciones Unidas. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311197/agenda-2030-y-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf>

Niasar, E. H. A., Dahmardeh, M., & Googarchin, H. S. (2020). Roadway piezoelectric energy harvester design considering electrical and mechanical performances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(1), 32–48. <https://doi.org/10.1177/0954406219873366>

NOM\_007\_ENER\_2014.pdf

*PATENTSCOPE*.(s. f.). <https://www.wipo.int/patentscope/es/>

México Evalúa. (2022). CFE, responsable del 17% de las emisiones de CO2 en México. *México Evalúa*. <https://www.mexicoevalua.org/cfe-responsable-del-17-de-las-emisiones-de-co2-en-mexico/#:~:text=Entre%20todas%20las%20actividades%20productivas,M%C3%A9xico%20con%20el%2032%25>

Portilla , M., Ludeña , R., Asanza , V. ., Dávila , M., & Nevarez, M. (2024). Diseño e Implementación de un Prototipo Portable de Generación Piezoeléctrica . *Revista Politécnica*, 54(1), 53–64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol54n1.06>

SECRETARIA DE ENERGÍA (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2014. DIARIO OFICIAL. Estados Unidos Mexicanos. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181647/N>

SENER. (2023). *Reporte de Avance de Energías Limpias*. Gob.mx. <https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2023/Anexo3.pdf>

Tamayo-Zapata, D., & Cardozo-Gutiérrez, N. (2017). El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá. <http://hdl.handle.net/10983/14488>

Van der Meulen, T. (2023). Piezoelectric Technology for Sustainable Energy Harvesting in

Amsterdam's Public Infrastructure. Urban Sustainability Reports, 11(1), 45-58.  
<https://doi.org/10.1016/j.usr.2023.05.002>