

Conversión de Energía Cinética en Electricidad: Análisis de Tecnologías Piezoeléctricas, Electromagnéticas y Electroestáticas para Potencial Uso en Tránsito Peatonal y Vehicular

Bohaczenko Federico A. ^a, Soto Iván ^a, Benítez Sebastián ^{a,c}, Hernandez Garcia, F. ^d,

Oliveira Mario O. ^{a,b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica -LIDEE, FI-UNaM.

^c Casa Fuentes S.A., Oberá, Misiones, Argentina.

^d Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, Brasil.

e-mails: bohaczenko.f.a@gmail.com, ivansoto1298@gmail.com, benitezsebastian@outlook.com,
felipehernandez@furgs.br, mario.oliveira@fio.unam.edu

Resumen

En este artículo se analizan tres tecnologías capaces de convertir energía cinética generada por tránsito peatonal y vehicular en electricidad, como una alternativa sustentable a las fuentes convencionales. Las tecnologías estudiadas son la piezoeléctrica, electromagnética y electrostática, donde se aborda el principio de funcionamiento, materiales, ventajas y limitaciones, además de aplicaciones comunes integrando perspectivas técnicas y prácticas. Se identifican las condiciones de uso para cada tecnología y se detalla como la energía obtenida es acondicionada y almacenada. Se demuestra, además, que la integración de estas tecnologías representa una oportunidad de microgeneración para complementar el aporte de la red eléctrica, perfilándose como una vía de desarrollo estratégico en ingeniería electromecánica, ofreciendo soluciones escalables, adaptables y sostenibles.

Palabras Clave – energía cinética, microgeneración, eficiencia energética, tecnología sustentable, piezoelectricidad, inducción electromagnética.

1 Introducción

La creciente demanda de energía eléctrica a nivel global, sumada a la necesidad de mitigar el impacto ambiental de las fuentes tradicionales, ha motivado la búsqueda constante de soluciones energéticas innovadoras, limpias y adaptables al entorno urbano, con mínimo impacto. En este contexto, una porción significativa de la energía cinética generada por la actividad humana y el tránsito vehicular se pierde diariamente sin lograr aprovecharse. Esta energía, generada por movimientos simples como caminar, abrir puertas o circular sobre reductores de velocidad, representa una fuente renovable de energía que puede ser aprovechada, dado que aproximadamente entre 5 a 10 J por paso humano y hasta 100 a 500 J por vehículo ligero se disipan actualmente sin recuperación [1]-[2]-[3].

Desde el punto de vista físico, existen tres mecanismos fundamentales mediante los cuales puede captarse energía cinética para convertirla en electricidad, a saber: sistemas que utilizan el efecto piezoeléctrico, aquellos que hacen uso de la inducción electromagnética, y por último la variación de capacitancia en sistemas electrostáticos. Estas tecnologías son capaces de aprovechar vibraciones,

presiones y desplazamientos mecánicos, para generar energía eléctrica [2]-[4], y se basan en tres principios físicos fundamentales:

1. Efecto piezoeléctrico: materiales como PZT (Titanio de Zirconato de Plomo) o PVDF (Fluoruro de Polivinilideno) generan voltaje al deformarse mecánicamente, con eficiencias del orden del 10 al 20% en condiciones óptimas [5]. Su aplicación en baldosas o pavimentos es viable para bajas potencias (1–5 W/m²) [6].
2. Inducción electromagnética: sistemas basados en la ley de Faraday [4] logran mayores densidades energéticas (hasta 50–100 W/m² en reductores de velocidad) [3]-[6], pero requieren mantenimiento periódico y espacios dedicados.
3. Electrostática: aprovecha cambios de capacitancia en sensores microelectromecánicos (MEMS), con aplicaciones en sensores autónomos, aunque su escalabilidad urbana es limitada [7].

Estudios recientes destacan que la elección tecnológica en cuanto a uso de estas tecnologías depende críticamente de [2], [4]:

- Escala de aplicación (uso peatonal vs. uso vehicular).
- Costo por kWh generado (los piezoeléctricos son más costosos por unidad de energía).
- Nivel de integración urbana (los sistemas piezoeléctricos alteran menos la comodidad peatonal en diseños modernos).

En este contexto, esta línea de investigación propone un enfoque sustentable, al transformar acciones cotidianas en energía eléctrica utilizable, reduciendo la dependencia de las redes eléctricas tradicionales y promoviendo prácticas de microgeneración locales.

La motivación principal de este artículo radica en explorar y evaluar el potencial de estas tecnologías, buscando validar su capacidad de contribuir a la diversificación energética y al desarrollo de ciudades más autosuficientes.

2 **Análisis comparativo de las tecnologías de captura cinética**

2.1 *Sistema piezoeléctrico*

i. *Principio de funcionamiento:*

En los sistemas piezoeléctricos, la electricidad es generada cuando ciertos materiales se deforman bajo una presión mecánica. Este fenómeno se conoce como *efecto piezoeléctrico directo*. El voltaje inducido es producido por la separación de cargas eléctricas dentro de un material cerámico cuando su estructura es alterada físicamente por esta presión dada.

ii. *Materiales:*

- Cerámicos: Titanato de Zirconato de plomo (PZT), cuarzo (SiO₂). Alta eficiencia (≈20%) pero frágiles [5].
- Polímeros: Fluoruro de polivinilideno (PVDF). Flexibles pero menor densidad energética (≈5%).

- Compuestos híbridos: PZT-PVDF para equilibrio entre durabilidad y rendimiento.
- Entre los materiales utilizados se pueden observar el cuarzo (SiO₂), el titanato de circonio y plomo (PZT), el fluoruro de polivinilideno (PVDF), como así también polímeros y compuestos híbridos.

iii. *Ventajas y limitaciones:*

Entre sus ventajas se destacan la ausencia de partes móviles, la alta durabilidad mecánica que poseen, el relativamente bajo mantenimiento comparado a otros sistemas, la posibilidad de ser miniaturizados según conveniencia para su fácil integración.

Sin embargo, la salida energética que producen es baja, con una corriente limitada (μA a mA), en caso de avería o rotura es necesario reemplazar el material en su totalidad, el cual es costoso. Además, su rendimiento se ve reducido fuera de condiciones óptimas de funcionamiento, lo que hace necesario una evaluación rigurosa respecto a su implementación [5].

2.2 Sistema de inducción electromagnética

i. *Principio de funcionamiento:*

En estos sistemas, la electricidad es generada cuando un conductor, generalmente una bobina de cobre se mueve dentro de un campo magnético (o viceversa). Se basa en el principio de inducción electromagnética, descubierto por Michael Faraday, y se rige bajo la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1)$$

donde ε = tensión inducida; N = número de espiras; $\Delta\phi$ = cambio en el flujo magnético; Δt = variación del tiempo.

ii. *Materiales:*

- Imanes permanentes: Aleaciones de neodimio (NdFeB) o ferrita.
- Bobinas: Cobre esmaltado (baja resistividad).
- Estructuras: Resorte acero inoxidable para movimientos lineales/rotativos [3].

iii. *Ventajas y limitaciones:*

Se ha demostrado que la potencia generada por estos sistemas es superior a la de los sistemas piezoeléctricos [4], y poseen buena eficiencia energética, y pueden ser usados en presencia de cargas importantes, como lo son el paso de vehículos [3]. Sin embargo, se han identificado desventajas como el tamaño relativamente voluminoso, la necesidad de mantenimiento en forma periódica, la complejidad en su instalación y sensibilidad a campos magnéticos externos.

2.3 Sistema electrostático

i. *Principio de funcionamiento:*

En sistemas de recolección electrostática, la electricidad es obtenida mediante la variación en la capacitancia entre dos electrodos móviles. Estos sistemas no requieren de materiales activos, sino que transforman movimiento mecánico en energía eléctrica mediante el cambio en la geometría de un condensador. Estos sistemas poseen una complejidad en la electrónica y son muy sensibles a interferencias mecánicas, por lo cual funcionan mejor en entornos controlados y dispositivos especializados, por ende, es el menos utilizado de los sistemas en lo que se refiere a generación urbana de electricidad [4].

ii. *Materiales:*

- Electrodos: Oro o aluminio (alta conductividad).
- Dieléctricos: Aire o polímeros para minimizar pérdidas.
- Estructuras: MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems).

iii. *Ventajas y limitaciones:*

No presenta materiales activos y tiene bajo costo en microescala. Además, tiene buena eficiencia en frecuencias bajas lo que lo hace ideales para movimientos lentos. Por el contrario, tiene una potencia mínima tornándolo no viable para aplicaciones urbanas. Presenta complejidad electrónica y sensibilidad ambiental, a la humedad o polvo.

2.4 Aplicaciones comunes de las tecnologías

La energía generada mediante tecnología piezoeléctrica ha sido incorporada en suelas de calzado, donde la energía de cada pisada es aprovechada para alimentar pequeñas luces. También ha sido integrada en zonas de alto tránsito peatonal, utilizando sistemas de baldosas fabricadas con materiales piezoeléctricos [7], y en dispositivos portátiles.

Los sistemas de inducción electromagnética se emplean principalmente en dispositivos donde los movimientos amplios y potentes pueden ser aprovechados para generar mayores niveles de energía, desde molinetes en estaciones de trenes y de colectivo, en máquinas de ejercicio en gimnasio, hasta en reductores de velocidad en vías urbanas. Si bien su uso en sistemas de baldosas siempre ha quedado relegado a segundo lugar por sobre las baldosas piezoeléctricas, debido a la incomodidad al caminar sobre ellas, esto está cambiando en los últimos años con la implementación de tecnologías como *Pavegen* [7].

La tecnología electrostática ha sido utilizada en dispositivos de escala micro, especialmente en sistemas *MEMS* (micro-electro-mechanical systems), donde se requieren fuentes de energía pequeñas y autónomas, como lo son sensores especializados.

En términos de densidad energética, los sistemas de inducción electromagnéticos han ofrecido la mayor salida en condiciones óptimas, seguidos por los piezoeléctricos, mientras que la escala de los electrostáticos ha sido un limitante. En cuanto a integración, los piezoeléctricos han ofrecido mayor flexibilidad, los electromagnéticos por su parte, han requerido de espacios más significativos.

La energía almacenada puede utilizarse para sistemas de iluminación públicos o de emergencia, especialmente sistemas LED ya que estos requieren de poca energía. En zonas de tráfico pueden instalarse sistemas de señalizaciones que funcionen sin conexión a la red eléctrica, sino que en su lugar son alimentados por la energía almacenada. También pueden ser utilizados para el

funcionamiento de sensores autónomos para monitoreo. En plazas y estaciones de tren o bus, es común ver espacios de carga de dispositivos portátiles por USB, estos puntos también pueden ser alimentados por la energía obtenida de los sistemas de captura cinética, ya que, en su mayoría, dispositivos como *smartphones* y *wearables* no precisan de un alto voltaje.

La Tabla 1, presenta un resumen comparativo entre las diferentes tecnologías analizadas. En esta se puede destacar las características principales de cada tecnología [3]-[4]-[6].

Tabla 1 – Comparación de tecnologías

Parámetro	Piezoeléctrico	Electromagnético	Electrostático
Densidad energética	1-20 W/m ²	10-100 W/m ²	<0.1 W/m ²
Costo (USD/m ²)	200-500	100-300	50-150 (solo MEMS)
Mantenimiento	Bajo	Moderado/Alto	Bajo
Escala optima	Peatonal/Redes de sensores	Vehicular/Infraestructura	Microdispositivos

3 Almacenamiento de la energía generada

La energía generada por sistemas piezoeléctricos y electromagnéticos es inherentemente intermitente y en corriente alterna (CA), lo que exige etapas críticas de acondicionamiento y almacenamiento para su uso práctico. A continuación, se detallan las soluciones técnicas respaldadas por literatura reciente.

a. Rectificación y acondicionamiento de la señal:

- Rectificación: conversión de CA a corriente continua (CC) mediante puentes de diodos (ej.: configuración de onda completa) [8].
- Regulación: Uso de circuitos integrados para evitar picos de tensión y ajustar la salida a niveles útiles (3,3 V, 5 V, etc.) [9].
- Elevación de tensión: Convertidores CC-CC (ej.: basados en el chip TPS61200) para aumentar voltajes bajos (0,5–2 V) a rangos utilizables ($\geq 3,7$ V) [10].

b. Almacenamiento Primario (Capacitores):

Su función es estabilizar la energía antes de su transferencia a baterías.

- Supercapacitores: ideales por su alta densidad de potencia (≈ 10 kW/kg) y ciclos de carga/descarga ilimitados [11].
- Capacitores electrolíticos: Alternativa económica para sistemas de baja potencia (<1 W) [12].

c. Almacenamiento Secundario (Baterías):

Tecnologías aplicables.

- Baterías de Li-ion: Alta densidad energética (150–200 Wh/kg) y voltajes compatibles (3,7 V). [13].
- Baterías de estado sólido: Emergentes, con mayor seguridad y vida útil.
- Baterías de flujo: Para aplicaciones a gran escala.

El almacenamiento eficiente requiere combinar supercapacitores (para manejar picos) y baterías Li-ion (para energía sostenida), respaldados por electrónica de control (protección). La Tabla 2 presenta un resumen de las ventajas y limitaciones de las tecnologías de almacenamiento analizadas.

Tabla 2 – Ventajas y limitaciones de las tecnologías de almacenamiento

Componente	tecnología	Ventajas	Limitaciones
Rectificación	Puente de diodos	Bajo costo, simplicidad	Pérdidas por caída de voltaje
Supercapacitores	Maxwell 2,7 V/100 F	Alta potencia, ciclos ilimitados	Baja densidad energética
Baterías	Li-ion	Alta densidad energética	degradación térmica

4 **Conclusión**

A través del presente artículo, se ha realizado un estudio del estado del arte y demostrado que la energía cinética generada por actividades cotidianas, principalmente tránsito peatonal y vehicular, puede ser efectivamente aprovechada mediante tecnologías de conversión energética. Se han analizado tres tecnologías clave para la conversión de energía cinética en electricidad: piezoeléctrica, electromagnética y electrostática, comparadas y analizadas desde una perspectiva técnica, identificando sus fortalezas, limitaciones y áreas de aplicación.

Queda en evidencia que, según el contexto y la escala del sistema, se selecciona una u otra tecnología, con el fin de maximizar la eficiencia de conversión y facilitar la integración urbana. Se ha aportado un marco comparativo entre las tecnologías disponibles para evaluar su viabilidad en escenarios urbanos.

Es notable que el campo de la microgeneración energética mediante dispositivos de captura cinética presenta un espacio de gran crecimiento para la ingeniería, y que el continuar desarrollando e integrando estos sistemas a espacios urbanos representa un camino hacia un aprovechamiento energético más sustentable.

5 Referencias

- [1] T. Jintanawan, G. Phanomchoeng, S. Suwankawin, P. Kreepoke, P. Chetchatree, C. Uviengchai, “*Design of Kinetic-Energy Harvesting Floors*”, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2020
- [2] L. Wang, Z. Fei, Y. Qi. C. Zhang, “*Overview of human kinetic energy harvesting and application*” in *ACS Applied Energy Materials*, Vol. 5, issue 6, USA, 2022.
- [3] F. J. A. Duarte, “*Pavement energy harvesting system to convert vehicles kinetic energy into electricity*”, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil. Eng., Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, Portugal, 2017.
- [4] H. Vocca, F. Cottone, “*Kinetic Energy Harvesting*”, 2014.
- [5] H. Elahi, M. Eugeni, P Gaudenzi, “*A Review on mechanisms for piezoelectric-based energy harvesters*”, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Sapienza University, Rome, Italy, 2018.
- [6] S. P. Beeby, N. M. White, “*Energy Harvesting for Autonomous Systems*”, 2010.
- [7] T. N. Sandhya, “*Energy harvesting from human motion in smart cities*”, bachelor’s thesis, Energy and Environmental Eng., Tampere University of Applied Sciences, Finland, 2021.
- [8] S. Roundy, “*On the Effectiveness of vibration-based Energy Harvesting*”, in *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, pp. 808-823, Oct. 2005.
- [9] H. A. Sodano, D. J. Inman, G. Park, “*A Review of Power harvesting from vibration using piezoelectric materials*”, in *The Shock and Vibration Digest*, vol. 36, pp. 197-205, May 2004.
- [10] X. Jiang, J. Polastre, and P. Wright, “*Ultra-Low-Input-Voltage DC-DC Converters for Energy Harvesting Applications*,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4235–4248, 2019.
- [11] B. E. Conway, “*Electrochemical Supercapacitors*”, 1999.
- [12] R. Kötz, M. Carlen, “*Principles and applications of electrochemicals capacitors*”, in *Electrochimica Acta*, vol. 45, pp. 2483-2498, May 2000.
- [13] J. M. Tarascon, M. Armand, “*Issues and Challenges Facing Rechargeable Litium Batteries*”, in *Nature*, vol.414, pp. 359-367, Nov. 2001.