

Editorial

Perspectivas de la cosecha de energía mediante vigas piezoeléctricas

Perspectives on Energy Harvesting Using Piezoelectric Beams

Jorge Enrique Herrera Arroyave, PhD(c).

La cosecha de energía (*energy harvesting, en inglés*), se define como el conjunto de estrategias orientadas a capturar energía residual disponible en forma vibracional, eólica, térmica, solar, electromagnética, electrostática, inductiva o piezoeléctrica y convertirla en potencia eléctrica útil para suministrarla a sistemas de bajo consumo [1], [2]. En este campo, la conversión piezoeléctrica ha adquirido relevancia por su alta densidad de potencia, ausencia de interferencia electromagnética, facilidad de miniaturización y compatibilidad con sensores, MEMS y nodos inalámbricos [3], [4], [5]. Dentro de las configuraciones estructurales más estudiadas, se encuentran las vigas en voladizo con parches piezoeléctricos que concentran esfuerzos cerca del empotramiento, lo cual favorece la conversión electromecánica [5], [6]. Los tipos de piezoeléctricos más usados son: zirconato titanato de plomo (PZT), fluoruro de polivinilideno (PVDF) y compuesto de macrofibras piezoeléctricas MFC, seleccionados de acuerdo con su grado de rigidez, acoplamiento electromecánico, flexibilidad, biocompatibilidad y tamaño [3], [4].

Desde el punto de vista mecánico, el diseño de cosechadores vibracionales exige formular modelos elásticos capaces de predecir modos propios y frecuencias naturales [7]. En vigas delgadas, la teoría de Euler-Bernoulli suele conducir a una ecuación diferencial homogénea cuya solución modal se obtiene mediante la ecuación característica y el problema de valores propios asociado a sus condiciones de frontera [8]; por lo que, la teoría de Timoshenko puede resultar necesaria para efectos de fuerzas cortantes e inercia rotacional [9]. La proyección modal de Galerkin permite reducir el modelo continuo a coordenadas generalizadas, preservando la contribución dominante de los modos estructurales relevantes, mediante la proyección de los mismos modos facilitando el acoplamiento con el circuito eléctrico [10], [11]. Esta reducción resulta esencial en modelos Flujo-Sólido-Potencia eléctrica, donde la respuesta aeroelástica y la salida eléctrica deben resolverse de forma acoplada [12].

Por otro lado, el modelo piezoelástico se fundamenta en ecuaciones constitutivas lineales que relacionan esfuerzo, deformación, campo y desplazamiento eléctrico [4], [13]. En modo directo, la deformación inducida por vibración genera carga eléctrica; en modo inverso, el campo eléctrico induce deformación mecánica. Esta bidireccionalidad permite construir ecuaciones acopladas entre la dinámica estructural y la ecuación eléctrica del circuito resistivo [7]. Los resultados reportados evidencian rangos de potencia diversos: se han obtenido 14.85 μW en vigas piezoeléctricas simuladas por FEM [5], 4.4 mW en una viga bimorfa optimizada [4], 3 mW en un panel alar aeroelástico a 12 m/s [12], 1.12 mW en cosecha por aleteo por bandera (*flag flutter*) [14], 2.63 mW en un sistema piezoaeroelástico con aleta de borde de salida [15], y hasta 0.3233 W en una configuración basada en aleteo por pérdida (*stall flutter*) [1]. Estos valores confirman que el aleteo, tradicionalmente considerado como una inestabilidad destructiva, puede aprovecharse como una fuente autosostenida de vibración para recuperar energía de flujos residuales, corrientes de aire o estelas de equipos industriales y aeroespaciales [16], [17].

Por lo anterior, las aplicaciones potenciales de los sistemas de cosecha para suministro de energía incluyen: sensores autónomos, electrónica portátil, MEMS, monitoreo estructural, sistemas aeronáuticos, microvehículos aéreos y CubeSats, donde la reducción de masa, cableado y dependencia de baterías constituye un criterio de diseño crítico [3], [12], [18]. Sin embargo, la madurez tecnológica requiere metodologías rigurosas de verificación y validación [19]. Los modelos analíticos derivados de ecuaciones diferenciales deben contrastarse con simulaciones FEM en COMSOL, ANSYS, SolidWorks o MSC Nastran y, posteriormente, validarse experimentalmente mediante ensayos de vibración o túnel de viento [6], [15]. De acuerdo con la literatura de V&V computacional, la credibilidad predictiva depende de distinguir error numérico, incertidumbre experimental, verificación del código, verificación de solución y validación del modelo físico [19]. Por último, los desafíos actuales se

concentran en ampliar el ancho de banda operativo, reducir la dependencia estricta de la resonancia, incorporar no linealidades aeroelásticas, optimizar la ubicación del parche, cuantificar incertidumbres y escalar la potencia sin comprometer integridad estructural ni reproducibilidad experimental [17], [20].

REFERENCIAS

- [1] C. Bao, Y. Dai, P. Wang, and G. Tang, "A piezoelectric energy harvesting scheme based on stall flutter of airfoil section," *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, vol. 75, pp. 119–132, 2019, doi: 10.1016/j.euromechflu.2018.11.019.
- [2] E. I. M. Pawing *et al.*, "Characterization of Flexible Piezoelectric Cantilever in Vibration Energy Harvesting," *Proceedings - 2022 12th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2022*, pp. 59–62, 2022, doi: 10.1109/ICCSCE54767.2022.9935665.
- [3] A. Aabid *et al.*, "A Systematic Review of Piezoelectric Materials and Energy Harvesters for Industrial Applications," *Sensors 2021, Vol. 21, Page 4145*, vol. 21, no. 12, p. 4145, Jun. 2021, doi: 10.3390/S21124145.
- [4] W. P. Q. Tong, B. M. S. Muhammad Ramadan, and T. Logenthiran, "Design and Simulation of a Piezoelectric Cantilever Beam for Mechanical Vibration Energy Harvesting," *International Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia 2018*, pp. 1245–1250, Sep. 2018, doi: 10.1109/ISGT-ASIA.2018.8467796.
- [5] N. Uddin, S. Islam, J. Sampe, S. H. M. Ali, and M. S. Bhuyan, "Design and simulation of piezoelectric cantilever beam based on mechanical vibration for energy harvesting application," *2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology, ICISSET 2016*, Feb. 2017, doi: 10.1109/ICISSET.2016.7856532.
- [6] M. N. Uddin, M. S. Islam, J. Sampe, S. A. Wahab, and S. H. Md Ali, "Vibration based T-shaped piezoelectric cantilever beam design using finite element method for energy harvesting devices," *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Proceedings, ICSE*, vol. 2016-September, pp. 137–140, Sep. 2016, doi: 10.1109/SMELEC.2016.7573610.
- [7] M. Bryant and E. Garcia, "Modeling and testing of a novel aeroelastic flutter energy harvester," *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, vol. 133, no. 1, 2011, doi: 10.1115/1.4002788.
- [8] R. Hosseini, O. Zargar, and M. Hamed, "Improving Power Density of Piezoelectric Vibration-Based Energy Scavengers," *Journal of Solid Mechanics*, vol. 10, no. 1, pp. 98–109, Dec. 2018.
- [9] R. C. Hibbeler, "Bending," in *Engineering Mechanics: Mechanics of Materials*, 10th ed., UK: Pearson, 2018, ch. 6, p. 0.
- [10] C. Vanhille, A. Lavie, and C. Campos Pozuelo, *Modélisation numérique en mécanique: introduction et mise en pratique*, 1st ed. 2007.
- [11] Y. Chen *et al.*, "Flutter Phenomenon in Flow Driven Energy Harvester-A Unified Theoretical Model for 'stiff' and 'flexible' Materials," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, Oct. 2016, doi: 10.1038/srep35180.
- [12] X. Shan, H. Tian, and T. Xie, "Energy Harvesting Performance of a Wing Panel for Aeroelastic Vibration," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 19, no. 09, p. 1950102, Sep. 2019, doi: 10.1142/S0219455419501025.
- [13] S. Rafique, "Distributed Parameter Modelling and Experimental Validation," in *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments*, Springer International Publishing, 2017, pp. 31–58. doi: 10.1007/978-3-319-69442-9.
- [14] M. Eugeni *et al.*, "Numerical and experimental investigation of piezoelectric energy harvester based on flag-flutter," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 97, p. 105634, 2020, doi: 10.1016/j.ast.2019.105634.
- [15] H. Tian, X. Shan, J. Zhang, G. Sui, and T. Xie, "Performance investigation of piezoaeroelastic energy harvester with trailing-edge flap," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 334, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.sna.2021.113345.
- [16] Q. Ullah, T. Rauta, J. Keskkikuru, J. Haverinen, and P. Ruuskanen, "Innovations in energy harvesting: A survey of low-power technologies and their potential," *Energy Reports*, vol. 14, pp. 671–692, Dec. 2025, doi: 10.1016/J.EGYR.2025.06.019.
- [17] J. M. McCarthy, S. Watkins, A. Deivasigamani, and S. J. John, "Fluttering energy harvesters in the wind: A review," 2016, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jsv.2015.09.043.
- [18] B. Bermúdez-Reyes, J. E. Herrera Arroyave, P. Zambrano Robledo, R. Vargas-Bernal, and J. A. Ferrer Pérez, "Dynamic Computational Analysis of a Cubesat Structure to Test a New Material for a Space-Radiation Protection Shield," pp. 97–116, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-20675-7_6/TABLES/4.
- [19] W. L. Oberkampf and T. G. Trucano, "Verification and validation in computational fluid dynamics," 2002.
- [20] H. Verbraken, G. Lombaert, and G. Degrande, "Verification of an empirical prediction method for railway induced vibrations by means of numerical simulations," *J. Sound Vib.*, vol. 330, no. 8, pp. 1692–1703, 2011, doi: 10.1016/j.jsv.2010.10.026.



Jorge Enrique Herrera Arroyave. Es ingeniero Mecánico. Magister en Ingeniería Aeronáutica. Candidato a doctor en Ciencias – Física de la Universidad Tecnológica de Pereira UTP. Profesor de Ingeniería de la Universidad Católica de Pereira UCP. Es miembro del grupo de investigación en Propiedades Magnéticas y Magneto - Ópticas de Nuevos Materiales (UTP) y del grupo de investigación Entre Ciencia e Ingeniería (UCP). Sus áreas de interés son: diseño mecánico, dinámica de estructuras, energías limpias. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-2593>.