



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i4.2436>

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Revisión

*Análisis del estado actual de la cosecha de energía por medio de vibraciones  
producidas por cargas de viento*

*Analysis of the current state of the energy harvest by means of vibrations  
produced by wind loads*

*Análise do estado atual da captação de energia por meio de vibrações produzidas  
por cargas de vento*

Carlos Montes-Rodríguez <sup>I</sup>

[carlos.montes@utm.edu.ec](mailto:carlos.montes@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-8302-4056>

Jesús Alberto Pérez-Rodríguez <sup>II</sup>

[jesus.perez@utm.edu.ec](mailto:jesus.perez@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-1578-2565>

Miguel Herrera-Suárez <sup>III</sup>

[miguel.herrera@utm.edu.ec](mailto:miguel.herrera@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-4567-5872>

**Correspondencia:** [carlos.montes@utm.edu.ec](mailto:carlos.montes@utm.edu.ec)

\***Recibido:** 30 de octubre de 2021 \***Aceptado:** 28 de noviembre de 2021 \* **Publicado:** 13 de diciembre de 2021

- I. Ingeniero Mecánico, Estudiante de la Maestría de Investigación en Mecánica mención Eficiencia Energética, Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Profesor Titular, Tiempo Completo. Departamento de Eléctrica. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- III. Profesor Titular Principal II, Tiempo Completo. Departamento de Mecánica, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el estado actual de la cosecha de energía por medio de vibraciones producidas por cargas de viento. Para cumplir con el objetivo, inicialmente se analizan las principales fuentes para la generación de energía, posteriormente se realiza un estudio sobre la evolución de los sistemas de recolección de energía renovable y los métodos de transducción piezoeléctrica para la conversión de las vibraciones, finalmente se describen los métodos utilizados para investigar las cosechadoras de energía. El análisis realizado evidencia que, a pesar de existir múltiples fuentes de energía renovables, la recolección de energía a partir de vibraciones emitidas por las cargas de viento es una importante alternativa. Por otra parte, el empleo de materiales piezoeléctricos compuestos ha permitido que, las vibraciones se aprovechen con alto porcentaje de conversión en energía útil, siendo el método de transducción idóneo para transformar las vibraciones producidas por cargas de viento. De igual forma se pone de manifiesto que el método de la dinámica de fluido computacional ha sido el método más empleado en este tipo de investigaciones, debido a la posibilidad de investigar los efectos de fluido acoplados con análisis modales. Los modelos de cosechadoras de paneles rectos o con articulaciones como los modelos en forma de L, T, D, C, han sido los más utilizados hasta el momento. Las dimensiones de los órganos de trabajo influyen en la densidad de potencia, el volumen de la cosechadora y la potencia por unidad de volumen a generar.

**Palabras clave:** Cosecha de energía; transducción piezoeléctrica; CFD; vibraciones.

## Abstract

The present work aims to analyze the current status of energy harvesting by means of vibrations produced by wind loads. To meet the objective, initially the main sources for energy generation are analyzed, then a study on the evolution of renewable energy harvesting systems and piezoelectric transduction methods for vibration conversion is carried out, finally the methods used to investigate energy harvesters are described. The analysis performed evidences that, despite the existence of multiple renewable energy sources, harvesting energy from vibrations emitted by wind loads is an important alternative. On the other hand, the use of piezoelectric composite materials has allowed the vibrations to be used with a high percentage of conversion into useful energy, being the ideal transduction method to transform the vibrations produced by

wind loads. Likewise, it is shown that the computational fluid dynamics method has been the most used method in this type of research, due to the possibility of investigating the fluid effects coupled with modal analysis. Harvester models with straight panels or with joints such as L-, T-, D-, C-shaped models have been the most used so far. The dimensions of the working parts influence the power density, the volume of the harvester and the power per unit volume to be generated.

**Keys words:** Energy harvesting; piezoelectric transduction; CFD; vibrations.

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo analisar o estado atual da captação de energia por meio de vibrações produzidas por cargas de vento. Para cumprir o objetivo, inicialmente são analisadas as principais fontes de geração de energia, posteriormente é realizado um estudo sobre a evolução dos sistemas de coleta de energia renovável e métodos de transdução piezoelétrica para a conversão de vibrações, por fim são descritos os métodos utilizados para investigar colheitadeiras de energia. . A análise realizada mostra que, apesar da existência de múltiplas fontes de energia renováveis, a captação de energia proveniente das vibrações emitidas pelas cargas eólicas é uma alternativa importante. Por outro lado, a utilização de materiais compósitos piezoelétricos tem permitido que as vibrações sejam utilizadas com alto percentual de conversão em energia útil, sendo o método de transdução ideal para transformar as vibrações produzidas por cargas de vento. Da mesma forma, revela-se que o método computacional de dinâmica de fluidos tem sido o método mais utilizado neste tipo de pesquisa, devido à possibilidade de investigar efeitos de fluidos acoplados à análise modal. Os modelos de colheitadeiras com painéis retos ou com articulações, como os modelos em forma de L, T, D, C, têm sido os mais utilizados até agora. As dimensões dos órgãos de trabalho influenciam a densidade de potência, o volume da colheitadeira e a potência por unidade de volume a ser gerada.

**Palavras-chave:** Colheita de energia; transdução piezoelétrica; CFD; vibrações.

## Introducción

Los recursos no renovables se constituyen como el factor clave en el desarrollo de los países, sin embargo, su uso crea contaminación y al mismo tiempo acelera el calentamiento global.

En la actualidad con más frecuencias se utilizan recursos renovables para poder sustentar una parte de su consumo eléctrico y al mismo tiempo reducir la quema de combustibles que generan efectos negativos al medio ambiente, esto ha permitido que se desarrollen tecnologías para la recolección de energía a partir de fuentes alternativas (Bonilla et al., 2017; García et al., 2016; Soto et al., 2018).

Las fuentes de energía renovables de las cuales podemos recolectar energía son principalmente solar, eólica, hídrica, térmica, biomasa y cualquier actividad propia del ser humano considerándolo como un sujeto perturbador o de una fuente externa como procesos industriales y maquinarias. Las tecnologías desarrolladas para captar la energía de cada una de las variantes necesitan que se cumplan parámetros mínimos de funcionamiento como velocidad de viento, energía potencial, radiación solar directa, calor aportado o liberado, esfuerzos, entre otros (Cetin et al., 2019; Sola et al., 2017; Vera et al., 2019).

La producción de energía eléctrica a partir de la cosecha de vibraciones producidas por cargas de viento se muestra como una variante atractiva en la actualidad debido a los diversos sistemas de micro consumo que se pueden alimentar como pequeños vehículos aéreos y dispositivos electrónicos estacionarios o ubicados en localizaciones de difícil acceso para el suministro de energía convencional (Li et al., 2016; McCarthy et al., 2016).

Las cargas de viento o energía eólica pueden producir en estructuras o geometrías vibraciones de varios tipos como inducidas por vórtice, estela, aleteo y galope. El aprovechamiento de estas vibraciones aeroelásticas se puede obtener a través de las técnicas de transducción electromagnética, electrostática y piezoeléctrica (Abdelkefi, 2016; Evans et al., 2019; Guo et al., 2020; Li et al., 2016; Takhedmit et al., 2017; Yildirim et al., 2017), esta última se establece como la variante predominante que tiene una mayor densidad de potencia al no presentar interferencia electromagnética (X. Zhao et al., 2020), además de tener como respaldo producciones científicas novedosas (Hamlehdar et al., 2019; Maamer et al., 2019).

Para la producción de energía eléctrica por el método de transducción piezoeléctrica a partir de la recolección de vibraciones, el material se encuentra adherido a una superficie que esta destina a oscilar o que siempre se encuentra en vibración. Los puntos de flexión o torción de las superficies de las cosechadoras generan un cambio en el parámetro geométrico del material piezoeléctrico, lo

cual produce un movimiento de electrones que posteriormente se transforma en una salida de energía eléctrica (McCarthy et al., 2016).

El desarrollo de materiales piezoeléctricos con mejores características (Zaldívar, 2016), permiten elevar el rendimiento de las cosechadoras de energía que utilizan este principio para convertir el esfuerzo mecánico de presión o torsión en una salida de voltaje o potencia. En base a estos antecedentes, el objetivo del trabajo es analizar el estado actual de la cosecha de energía por medio de vibraciones producidas por cargas de viento.

### **Fuentes principales para recolectar energía**

La cosecha de energía se entiendo como el proceso de captación de energía a partir de fuentes inmersas en el medio ambiente, como la energía solar, térmica, cinética o potencial que pueden ser transformas en una forma de energía más aprovechable para dispositivos o artefactos (Abdelkefi, 2016; Zhang et al., 2018).

Una de las tecnologías más empleadas para la cosecha de energía es el uso de los paneles solares los cuales exhiben un rendimiento muy aceptable siempre que se tenga una radiación solar directa, pero no son recomendables para zonas con contaminación de aire (Sampaio & González, 2017; Vera et al., 2019). La energía térmica de fuentes geotérmicas también puede ser aprovechable para generación de calor, vapor o electricidad por medio del método Seebeck (Abdelkefi, 2016; Cetin et al., 2019; Naranjo et al., 2019; Sola et al., 2017; Xie et al., 2018; Ye et al., 2017).

La tecnología para la recolección de vibraciones se encuentra en crecimiento y se confirma a través de las producciones científicas realizadas en los últimos años. Las vibraciones en los cuerpos son producto de las acciones por el viento, ruidos, olas o temblores y no presentan limitaciones en cuanto a condiciones ambientales (cielo nublado o despejado), o tiempo de recolección (día o noche) (Abdelkefi, 2016).

Algunos ejemplos de fuentes generadoras de vibraciones pueden ser ondas sonoras o longitudinales (ruido), el tránsito de un vehículo sobre una calzada o asfalto, la interacción del viento sobre una estructura, una persona corriendo realiza un impacto en el suelo o en su cuerpo, etc. (Chen et al., 2020; Evans et al., 2019; Hamlehdar et al., 2019; Hidayanti et al., 2020; Setiawan, 2019).

Con el uso de la tecnología apropiadas y condiciones ambientales idóneas, algunas de las variantes naturales de energía se superponen como opción más viable de obtener energía útil, como el caso de las recolecciones de vibraciones a partir de las cargas de viento. De acuerdo con X. Zhao et al. (2020), en el caso de recolección de vibraciones, el método de transducción piezoeléctrica tiene una alta densidad de potencia y no presenta interferencia electromagnética alguna.

El material piezoeléctrico en las cosechadoras de energía puede considerarse como un componente crucial que permite la conversión de las vibraciones en energía eléctrica, el proceso de conversión se realiza cuando las vibraciones ejercen un esfuerzo mecánico sobre el material piezoeléctrico lo cual produce un desplazamiento de electrones que posteriormente se convierten en una salida de voltaje (Abdelkefi, 2016).

La carga eléctrica de salida del material piezoeléctrico es proporcional al esfuerzo mecánico aplicado, este proceso se conoce como efecto directo, también existe el efecto inverso que consiste en aplicar una carga eléctrica a un material piezoeléctrico lo cual provoca que el mismo se deforme, ambos efectos han llamado la atención de los investigadores en los últimos tiempos (Hamlehdar et al., 2019).

La recolección de energía a partir de fuentes naturales es limitada para todos los casos, las tecnologías desarrolladas permiten la captación de cierto porcentaje del total de la energía provenientes de las fuentes naturales, por otro lado, la cosecha de energía puede darse a partir de la recolección de energía proveniente de un residuo de un fenómeno natural o de cualquier fuente externa como procesos industriales, maquinaria o incluso actividades propias del ser humano.

La potencia de salida de las cosechadoras de energía habitualmente está direccionadas a satisfacer pequeñas demandas energéticas. Los dispositivos electrónicos, sensores, actuadores, entre otros, muestran una alta eficiencia energética, además de un consumo eléctrico bajo, esto se atribuye debido al avance del campo de la electrónica (Ku et al., 2015).

Para tener una noción sobre los avances en la cosecha de energía, se muestra una comparación de los resultados de investigaciones relevantes sobre la densidad de potencia y los métodos aplicados (Tabla 1).

**Tabla 1.** Cosecha de energía a partir de fuentes naturales, resultados de investigación.

Fuente de energía	Transductor y método aplicado	Resultados relevantes	Autores
Solar	Células solares híbridas, método de dominio de tiempo de diferencia finitas	43,47 mA/cm <sup>2</sup>	(F. Zhao et al., 2020)
	Sistema solar fotovoltaico, celdas de combustibles	7924,2 kWh	(Siddiqui & Dincer, 2020)
	Colector solar, tecnología de absorción termoquímica	147,3 kWh/m <sup>3</sup>	(Ma et al., 2020)
	Bomba de calor, sistema híbrido de energía solar/lignito	50,3 MW	(Han et al., 2020)
Vibración	Recolección de energía de vibración en modo de flexión, Recolección de energía de vibración modo de torsión.	1,790 μW	(Li et al., 2020)
	Transducción piezoeléctrica, modelado de la interacción vehículo-pavimento.	8.19 mW/m	(X. Zhao et al., 2020)
	Efecto piezoeléctrico, superficie de captación de energía por suelo radiante.	39.1mW	(Evans et al., 2019)
	Cosechadora de energía de aleteo inducida por el viento, Aleteo aeroelástico.	18,2V y 3,75mA	(Aquino et al., 2017)
Térmica	Modulo híbrido, piezoeléctrico y térmico. El módulo piezoeléctrico produce 0.21 mW.	5.71 mW	(Zhao et al., 2014)
	En asfalto, en temporada de verano con (25-30) °C durante 8 h.	160 KWh	(Jiang et al., 2017)

### Evolución de los sistemas de recolección

En el año 1826, Thomas Johann Seebeck descubre un método que lleva su firma, el mismo consiste en la existencia de un flujo de energía en un circuito cerrado compuesto por dos metales distintos que se encuentra a diferente temperatura. Podría decirse que este hallazgo se convierte en una base para el inicio de la cosecha de energía en la historia (Sola et al., 2017; Ye et al., 2017).

En 1831, los investigadores Joseph Henry y Michael Faraday, con una serie de experimentos lograron obtener pequeñas cantidades de energía eléctrica a partir de magnetismo, con esto se realizó el primer generador de corriente continua, que consistía en una placa de cobre que rotaba entre polos magnético, generando así un flujo de electrones que a su vez se convertía en energía eléctrica (Elliott, 1993).

Pierre y Jacques Curie en 1880, notaron que ciertos materiales de origen natural tenían la capacidad de producir una carga de salida como resultado de aplicarles un esfuerzo mecánico de presión, además de notar que el voltaje era proporcional al esfuerzo aplicado (Uchino, 2017). En

la actualidad este fenómeno se denomina como efecto piezoeléctrico que puede darse en materiales naturales, sintéticos o compuestos (De Sousa & Manganiello, 2018).

En 1839, Edmund Becquerel descubre el efecto fotovoltaico por accidente, pues realizaba otros experimento en relación a celdas electrolíticas (Mah, 1998). Pierre y Jacques Curie en el año 1880, continuaron con sus experimentos e identificaron más de un elemento que obedecía al efecto piezoeléctrico, entre ellos se citan a la turmalina, cuarzo, topacio, caña de azúcar, y sal de Rochelle.

Experimentando con la turmalina y el cuarzo, se observó que la cantidad de electricidad de salida y la variación de presión es independiente de sus dimensiones (Velasco et al., 2018). Mas tardar en 1894, Charles Fritts desarrolla una celda solar que se constituía por una capa de selenio como base y un recubrimiento de oro (Damaschke, 1997).

Posteriormente, los hermanos Curie definieron las relaciones entre la presión y la salida de la carga eléctrica, con esto se obtiene el coeficiente del material piezoeléctrico que corresponde a la multiplicación de la tensión por la capacidad (Jiménez & Camarena, 2019). Gabriel Lippmann fue el responsable de descubrir el efecto inverso piezoeléctrico, que consiste en aplicar un campo eléctrico a este tipo de materiales y obtener como resultado deformaciones (Luque Forastero, 2019).

Entre los años 1912 y 1917, se incentivó la investigación en tecnología que utilizará el efecto piezoeléctrico para sistemas de navegación, dando como resultado el desarrollo de detectores ultrasónicos de 50 Hz principalmente utilizados por submarinos. También se desarrollaron instrumentos como micrófonos, audífonos, dispositivos para la grabación de sonido y para la medida de vibraciones, fuerza y aceleraciones (Gómez Molina, 2018; Luque Forastero, 2019).

Los investigadores Wool y Goldman, elaboraron material piezoeléctrico sintético en el año 1944, obteniendo la cerámica piezoeléctrica de titanio de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ). En consecuencia, también se desarrolla el titanato zirconato de plomo (PZT), este último tiene un gran número de aplicaciones y tiene una alta comercialización debido a su eficiencia (80%) que es superior con respecto al cuarzo (Zaldívar, 2016).

Existen aplicaciones recientes con el material piezoeléctrico polifluoruro de vinilideno (PVDF) en el campo de la aeronáutica, biomedicina, química y electricidad. Se considera como un componente relevante en la invención de sensores de presión, actuadores mecánicos y la

recolección de energía a partir de fuentes naturales debido a que en capas delgadas del material el coeficiente piezoeléctrico es 10 veces mayor en comparación a otros polímeros (De Sousa & Manganiello, 2018).

Naturalmente no se puede conseguir un material piezoeléctrico con propiedades significativas, pero a través de la combinación insoluble, la proporción adecuada y una unión en particular, el alcance de propiedades como la alta resistencia y la tenacidad se tornó posible.

Generalmente los materiales piezoeléctricos actuales se componen de dos fases, una activa y otra pasiva, para la parte activa se puede usar una cerámica piezoeléctrica, mientras que para la parte pasiva se utiliza un polímero o un vidrio. De esta manera las cerámicas y poliméricos se ven superados por los materiales compuestos, una de sus ventajas es el mejoramiento de recepción de altas frecuencias.

### **Método de transducción piezoeléctrica para la conversión de las vibraciones**

Tanto maquinarias como estructuras experimentan esfuerzos mecánicos, de estos esfuerzos predominando principalmente la presión y las vibraciones como fuente de energía residual del ambiente, particularmente no se recolecta ni se aprovecha esta energía, aunque se encuentra presente en puentes, edificaciones, maquinarias, carretera, entre otros, (Rajarathinam & Ali, 2018).

Es posible utilizar las vibraciones como fuente renovable de energía y a partir de mecanismos de conversión transformarla en energía eléctrica (Evans et al., 2019; Guo et al., 2020; Li et al., 2016; Takhedmit et al., 2017; Yildirim et al., 2017). La traducción piezoeléctrica es el método de transducción que predomina en la cosecha de vibraciones, y tiene como respaldo producciones científicas novedosas (Hamlehdar et al., 2019; Maamer et al., 2019).

El efecto piezoeléctrico se entiende como la propiedad de algunos materiales para que sus dipolos se polaricen, debido a la acción externa de una fuerza que puede ser un esfuerzo mecánico como la vibración, presión o incluso una carga eléctrica. El material piezoeléctrico que puede ser de diferentes tipos como cerámicos, poliméricos o compuestos (Yildirim et al., 2017).

Por lo general, para la producción de energía eléctrica a partir de la recolección de vibraciones, el material se encuentra adherido a una superficie que esta destinada a oscilar o que siempre se encuentra en vibración. Los puntos de flexión o torsión de las superficies de las cosechadoras generan un cambio en el parámetro geométrico del material piezoeléctrico, lo cual produce un

movimiento de electrones que posteriormente se transforma en una salida de energía eléctrica (McCarthy et al., 2016).

Se puede captar gran cantidad de vibraciones a partir de fuentes de energía como el viento, de las cargas de viento se puede obtener vibración inducida por vórtice, vibración inducida por estela, vibración inducida por el aleteo y vibración inducida por galope.

En función de las vibraciones aeroelásticas es posible suministrar de energía eléctrica a pequeños vehículos aéreos y dispositivos electrónicos que residen en un lugar remoto o por condiciones del terreno se considera de difícil acceso (Li et al., 2016; McCarthy et al., 2016).

### **Métodos utilizados para investigar las cosechadoras de energía producto de las vibraciones emitidas por las cargas de viento**

Para la investigación de las cosechadoras de viento se ha empleado el método de la modelación computacional y los métodos experimentales, fundamentalmente (Jamadar et al., 2016; Maamer et al., 2019; McCarthy et al., 2016). En muchos de los casos se ha recurrido a la combinación de ambos métodos

El método de la modelación matemática más utilizado es el método de fluido dinámica computacional (CFD), mediante el cual se han creado modelos que permiten simular una carga de viento que impacta la cosechadora de energía o sus órganos de recolección (Aquino et al., 2017; Shan et al., 2019; Wang et al., 2019; Zhou et al., 2019). La mayoría de estos modelos han sido validados o comprobados en las condiciones controladas de un túnel de viento con modelos físicos a pequeña escala (Ghasemian et al., 2017; Hamlehdar et al., 2019; Shan et al., 2019; Zhou et al., 2019).

Estos modelos se han desarrollado para simular velocidades del viento que oscilan entre los 1,8 a 23 m/s, tomando en cuenta las velocidades del viento en las zonas reales donde se quiere implementar las cosechadoras (Shan et al., 2019; Wei & Jing, 2017; Yildirim et al., 2017).

De manera general, el método CFD permite estudiar la interacción del modelo de cosechadora con un fluido, determinando si la geometría utilizada para el prototipo es capaz de generar vórtices de pequeñas dimensiones que produzcan a su vez vibraciones en la estructura (Abdelkefi, 2016; Ghasemian et al., 2017; Hamlehdar et al., 2019), sin embargo, los resultados que provee la metodología no incluyen los efectos en la estructura productos de las presiones y tensiones cortantes por acción de las cargas de viento.

Para un análisis más completo de los efectos de la interacción cosechadora-fluido, se incluye el acoplamiento de la técnica CFD con el método de elementos finitos (FEM) o análisis de frecuencias (FA), logrando así estudiar desplazamientos, deformaciones, frecuencias naturales de vibración y esfuerzos mecánicos (flexión o torsión) en el panel o estructura de la cosechadora, lo que permite optimizar prototipos con la finalidad de obtener un mejor desempeño (Akbar & Curiel-Sosa, 2019; Fu & Liao, 2018; Guo et al., 2020; Kuang et al., 2020).

Las variables de entrada que se utilizan en el diseño de las cosechadoras se pueden resumir en velocidad del viento, método de transducción y parámetros geométricos que incluyen: forma, coeficiente aerodinámico, dimensiones y material de constitución (Abdelkefi, 2016; Hamlehdar et al., 2019; Jamadar et al., 2016; Shan et al., 2019). Con respecto a las variables de salida, se ha demostrado la relación que existe entre la velocidad del flujo y el voltaje pico a pico de la cosechadora (Aquino et al., 2017; Wang et al., 2019). En la mayoría de los casos se relaciona la velocidad del fluido con respecto a la potencia eléctrica de salida, se varían las resistencia y se define la más apropiada para tener un suministro energético estable frente a la frecuencia de excitación (Shan et al., 2019; Zhou et al., 2019).

El desplazamiento máximo que la viga en voladizo de la cosechadora puede experimentar a partir de la carga suministrada por el fluido, es otra variable de interés global en estas investigaciones, debido a que define la magnitud del esfuerzo mecánico que se puede aprovechar a través de la transducción piezoeléctrica, además de localizar y definir las zonas más favorables para la ubicación del material transductor (Aquino et al., 2017; Shan et al., 2019; Wang et al., 2019).

Otra de las variables de salida que se analiza es la frecuencia de oscilación con la cual se desarrollan los desplazamientos, identificando las formas modales más aprovechables que pueden permitir la cosecha de energía en modo de flexión o torsión según las características del prototipo (Li et al., 2020; J. Liu et al., 2020; Shan et al., 2019). En resumen, con respecto a las frecuencias, se selecciona la forma modal que permita la cosecha de energía en modo flexión y que el eje de oscilación concuerde con la ubicación del material piezoeléctrico para que pueda absorber los esfuerzos mecánicos producidos (Shan et al., 2019). El modo de flexión no tiene la capacidad de generar deformaciones significativas para el transductor que comprometan su integridad física.

Se ha demostrado que cuanto mayor sea la velocidad del viento se obtendrá un mayor desplazamiento del órgano cosechador y por consiguiente se alcanzará una frecuencia de

oscilación (Aquino et al., 2017). Por otra parte, velocidades bajas con un coeficiente aerodinámico alto (cambio de geometría de captación) resultan en un desplazamiento considerable pero con baja frecuencia de oscilación (Zhou et al., 2019). De igual forma, reducir el espesor de los órganos del tipo viga en voladizo reduce la rigidez. Finalmente, ubicar masas en esquinas o extremos libres proporciona una menor resistencia a la oscilación (Li et al., 2020).

Las cosechadoras de energía pueden experimentar vibraciones en direcciones horizontales, verticales o ambas según su diseño. Son capaces de oscilar debido a una geometría que interrumpe el tránsito laminar las capas de fluido generando pequeños vórtices que acumulan o liberan presión de manera alternada después de la geometría induciendo el desplazamiento de la viga en voladizo generando así las vibraciones.

Referente a las características geométricas se ha evidenciado que, el espesor adecuado de los órganos de trabajo de las cosechadoras tipo viga en voladizo oscila desde 0,2 a 1 mm (Kwon, 2010; Li et al., 2016; Rajarathinam & Ali, 2018; Wen et al., 2014). Por otro lado, la longitud, altura y material tanto de la geometría de captación como la viga en voladizo varía según las preferencias de los autores a partir de los resultados de las simulaciones computacionales (Y. Liu et al., 2020; Shan et al., 2019; Wang et al., 2019).

Los trabajos realizados por J. Liu et al. (2020); Wang et al. (2019); Weinstein et al. (2012); Yang et al. (2013) exhiben una salida de potencia superior a bajas velocidades de viento debido a que aprovechan de manera eficiente las vibraciones inducidas por vórtices.

En la tabla 2, se resumen algunas de las variantes de modelo de cosechadora de viento que en algunos casos como hemos detallado se han validado por métodos experimentales y de simulación CFD. También se muestran las dimensiones más relevantes como espesor ( $E$ ), longitud ( $L$ ), ancho ( $A$ ), diámetro ( $D$ ) y las potencias de salidas alcanzadas ( $P$ ).

**Tabla 2.** Prototipo de cosechadoras para cargas de viento desarrolladas.

Prototipo de cosechadora y autor	Velocidad de viento estudiada (m/s) y variables estudiadas	Dimensiones y potencia generada
----------------------------------	--	---------------------------------

Análisis del estado actual de la cosecha de energía por medio de vibraciones producidas por cargas de viento

<p>(Kwon, 2010)</p>	<p>15 m/s</p> <p>Resistencia eléctrica contra voltaje, potencia, desplazamiento y frecuencia; Velocidad de viento contra voltaje, desplazamiento, potencia y frecuencia.</p>	<p><math>L = 100 \text{ mm}</math>  <math>A = 60 \text{ mm}</math>  <math>E = 0,2 \text{ mm}</math>  <math>P = 4 \text{ mW}</math></p>
<p>(Bryant &amp; Garcia, 2011)</p>	<p>9,1 m/s</p> <p>Velocidad de flujo contra amortiguación y frecuencia modal; Tiempo contra deflexión en punta; Velocidad de viento contra potencia promedio y frecuencia de aleteo.</p>	<p><math>L = 25,4 \text{ cm}</math>  <math>A = 2,54 \text{ cm}</math>  <math>E = 0,38 \text{ mm}</math>  <math>P = (0,8 - 2,2) \text{ mW}</math></p>
<p>(Akaydin et al., 2012)</p>	<p>11 m/s</p> <p>Micro esfuerzo contra desplazamiento y tiempo; Tiempo contra voltaje; Resistencia eléctrica contra potencia y frecuencia; Velocidad de viento contra potencia.</p>	<p><math>L = 267 \text{ mm}</math>  <math>A = 32,5 \text{ mm}</math>  <math>E = 0,635 \text{ mm}</math>  <math>P = 0,1 \text{ mW}</math></p>
<p>(Sirohi &amp; Mahadik, 2012)</p>	<p>4,7 m/s</p> <p>Tiempo contra voltaje; Resistencia contra pico de voltaje y potencia promedio; Velocidad de viento contra potencia promedio.</p>	<p><math>L = 235 \text{ mm}</math>  <math>A = 25 \text{ mm}</math>  <math>P = 1,14 \text{ mW}</math></p>
<p>(Weinstein et al., 2012)</p>	<p>(2,2 - 4,7) m/s</p> <p>Velocidad contra potencia generada y eficiencia; Resistencia eléctrica contra potencia.</p>	<p><math>L = 22,5 \text{ cm}</math>  <math>A = 11 \text{ cm}</math>  <math>P = 1 \text{ mW}</math></p>
<p>(Hobbs &amp; Hu, 2012)</p>	<p>(1,1 - 4,3) m/s</p> <p>Tiempo contra voltaje y velocidad angular.</p>	<p><math>D = 35 \text{ mm}</math>  <math>E = 0,4 \text{ mm}</math>  <math>L = 78 \text{ mm}</math>  <math>P = 0,055 \text{ mW}</math></p>
<p>(Gao et al., 2012)</p>	<p>(2 - 6) m/s</p> <p>Tiempo contra voltaje; Velocidad de viento contra frecuencia, potencia y voltaje inducido.</p>	<p><math>D_1 = 11,6 \text{ mm}</math>  <math>D_2 = 18,4 \text{ mm}</math>  <math>D_3 = 29,1 \text{ mm}</math>  <math>P = 0,03 \text{ mW}</math></p>
<p>(Abdelkefi &amp; Ghommem, 2013)</p>	<p>10 m/s</p> <p>Resistencia contra potencia generada.</p>	<p><math>L = 60 \text{ cm}</math>  <math>P = 0,2 \text{ mW}</math></p>

Análisis del estado actual de la cosecha de energía por medio de vibraciones producidas por cargas de viento

<p>(Yang et al., 2013)</p>	<p><b>8 m/s</b></p> <p>Resistencia eléctrica contra potencia de salida de geometrías a una misma velocidad;                  Velocidad de viento contra voltaje y potencia con diferentes geometrías.</p>	<p><math>A = 40 \text{ mm}</math>  <math>P = 8,4 \text{ mW}</math></p>
<p>(Wen et al., 2014)</p>	<p><b>2 m/s</b></p> <p>Tiempo contra voltaje; Presión contra tiempo con tres geometrías diferentes.</p>	<p><math>L = 33 \text{ mm}</math>  <math>A = 12 \text{ mm}</math>  <math>E = 1 \text{ mm}</math>  <math>P = 0,001 \text{ mW}</math></p>
<p>(Bibo et al., 2015)</p>	<p><b>2,3 m/s</b></p> <p>Velocidad contra deflexión y amplitud;                  Frecuencia vs deflexión.</p>	<p><math>L = 14,5 \text{ cm}</math>  <math>A = 1,4 \text{ cm}</math>  <math>E = 0,51 \text{ mm}</math>  <math>P = 0,22 \text{ mW}</math></p>
<p>(Shan et al., 2019)</p>	<p><b>25 m/s</b></p> <p>Tiempo contra desplazamiento y voltaje;                  Velocidad de viento contra frecuencias;                  Frecuencia contra desplazamiento; Potencia de salida contra resistencia eléctrica.</p>	<p><math>D = 200 \text{ mm}</math>  <math>A = 50 \text{ mm}</math>  <math>E = 0,2 \text{ mm}</math>  <math>P = 0,032 \text{ mW/cm}^3</math></p>
<p>(Wang et al., 2019)</p>	<p><b>1,8 m/s</b></p> <p>Tiempo contra voltaje; Velocidad de viento contra voltaje y potencia.</p>	<p><math>L = 0,118 \text{ m}</math>  <math>D = 0,032 \text{ m}</math>  <math>P = 1 \text{ mW}</math></p>
<p>(J. Liu et al., 2020)</p>	<p><b>7,5 m/s</b></p> <p>Desplazamiento (amplitud) contra tiempo;                  Salida de voltaje contra tiempo.</p>	<p><math>L = 80 \text{ mm}</math>  <math>A = 80 \text{ mm}</math>  <math>E = 0,35 \text{ mm}</math>  <math>P = 0,54 \text{ mW}</math></p>

Las variantes analizadas en el trabajo tienen geometrías diferentes y la forma de aprovechar las vibraciones producidas por las cargas de viento son innovadoras, sin embargo, las más significativas son aquellas que con una velocidad de viento baja tienen una mayor densidad de potencia, producto de altas frecuencias de oscilación, lo que pone en manifiesto que el diseño es

ideal para las condiciones ambientales presentes. Así, las variantes que aprovechan las vibraciones inducidas por aleteo, galope y vórtices (Abdelkefi, 2016; Aquino et al., 2017; Chen et al., 2018; Chen et al., 2017; Hamlehdar et al., 2019; J. Liu et al., 2020; McCarthy et al., 2016), tienden a presentar una mayor potencia de salida, debido a que los esfuerzos mecánicos de torsión o flexión producidos sobre la estructura exhiben una mayor magnitud.

## Conclusiones

Las fuentes de energía renovables son variadas (solar, térmica, eólica, entre otros), siendo la recolección de energía a partir de vibraciones una importante alternativa, pues no requiere de grandes inversiones y posee una menor potencia a consumir, haciendo que las dimensiones de los prototipos sean menores, así como el costo de fabricación o adquisición.

Los avances en el diseño de materiales piezoeléctricos compuestos con propiedades físicas y mecánicas superiores han permitido que, en la actualidad las vibraciones se aprovechen con alto porcentaje de conversión en energía útil para el suministro energético de pequeños equipos.

El método de transducción piezoeléctrico se superpone como la variante idónea para transformar las vibraciones producidas por cargas de viento debido a la versatilidad de uso y ubicación del material piezoeléctricas para aprovechar los esfuerzos de las superficies oscilantes, además de que exhibe una salida de potencia mayor en comparación a los otros dos métodos de transducción.

La dinámica de fluido computacional ha sido el método más empleado en la investigación y desarrollo de las cosechadoras de energía por cargas de viento, debido a la posibilidad de investigar los efectos de fluido acoplados con análisis modales.

Las aplicaciones actuales se encuentran limitadas a modelos de cosechadoras de paneles rectos o con articulaciones como los modelos en forma de L, T, D, C, entre otros, permitiendo cosechar mayor cantidad de vibraciones multidireccionales y multimodales (aleteo, galope y vórtices).

Las dimensiones de los órganos de trabajo de las cosechadoras varían en función de los modelos y principios de trabajo, pero por lo general se relaciona la densidad de potencia con el volumen físico de la cosechadora y la potencia por unidad de volumen a generar.

## Referencias

1. Abdelkefi, A. (2016). Aeroelastic energy harvesting: A review. *International Journal of Engineering Science*, 100, 112-135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2015.10.006>
2. Abdelkefi, A., & Ghommem, M. (2013). Piezoelectric energy harvesting from morphing wing motions for micro air vehicles. *Theoretical Applied Mechanics Letters*, 3(5), 052004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/2.1305204>
3. Akaydin, H., Elvin, N., & Andreopoulos, Y. (2012). The performance of a self-excited fluidic energy harvester. *Smart Materials Structures*, 21(2), 025007. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/2/025007>
4. Akbar, M., & Curiel-Sosa, J. (2019). An iterative finite element method for piezoelectric energy harvesting composite with implementation to lifting structures under Gust Load Conditions. *Composite Structures*, 219, 97-110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.070>
5. Aquino, A. I., Calautit, J. K., & Hughes, B. R. (2017). Evaluation of the integration of the Wind-Induced Flutter Energy Harvester (WIFEH) into the built environment: Experimental and numerical analysis. *Applied Energy*, 207, 61-77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.041>
6. Bibo, A., Abdelkefi, A., & Daqaq, M. F. (2015). Modeling and characterization of a piezoelectric energy harvester under combined aerodynamic and base excitations. *Journal of vibration acoustics*, 137(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4029611>
7. Bonilla, J., Roca, L., de la Calle, A., & Dormido, S. (2017). Modelo Dinámico de un Recuperador de Gases-Sales Fundidas para una Planta Termosolar Híbrida de Energías Renovables. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14(1), 70-81. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.11.003>
8. Bryant, M., & Garcia, E. (2011). Modeling and testing of a novel aeroelastic flutter energy harvester. *Journal of vibration acoustics*, 133(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4002788>
9. Cetin, A., Kadioglu, Y. K., & Paksoy, H. (2019). Underground thermal heat storage and ground source heat pump activities in Turkey. *Solar Energy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.055>

10. Chen, C., Sharafi, A., & Sun, J.-Q. (2020). A high density piezoelectric energy harvesting device from highway traffic—Design analysis and laboratory validation. *Applied Energy*, 269, 115073. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115073>
11. Chen, Y., Nan, J., & Wu, J. (2018). Wake effect on a semi-active flapping foil based energy harvester by a rotating foil. *Computers Fluids*, 160, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.10.024>
12. Chen, Y., Zhan, J., Wu, J., & Wu, J. (2017). A fully-activated flapping foil in wind gust: Energy harvesting performance investigation. *Ocean Engineering*, 138, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.027>
13. Damaschke, J. M. (1997). Design of a low-input-voltage converter for thermoelectric generator. *IEEE Transactions on industry applications*, 33(5), 1203-1207. <https://doi.org/10.1109/28.633797>
14. De Sousa, C., & Manganiello, L. (2018). Piezoelectric sensors applications in the detection of Contaminants in food. *Revista INGENIERÍA UC*, 25(3). <https://www.redalyc.org/journal/707/70757670014/70757670014.pdf>
15. Elliott, R. S. (1993). *Electromagnetics: history, theory and applications*. IEEE Computer Society Press.
16. Evans, M., Tang, L., Tao, K., & Aw, K. (2019). Design and optimisation of an underfloor energy harvesting system. *Sensors Actuators A: Physical*, 285, 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.12.002>
17. Fu, X., & Liao, W.-H. (2018). Nondimensional model and parametric studies of impact piezoelectric energy harvesting with dissipation. *Journal of Sound Vibration*, 429, 78-95. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.05.013>
18. Gao, X., Shih, W.-H., & Shih, W. Y. (2012). Flow energy harvesting using piezoelectric cantilevers with cylindrical extension. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), 1116-1118. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2187413>
19. García, E., Correcher, A., Quiles, E., & Morant, F. J. (2016). Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 13(2), 141-161. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.03.002>

20. Ghasemian, M., Ashrafi, Z. N., & Sedaghat, A. (2017). A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion Management*, 149, 87-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.016>
21. Gómez Molina, Á. (2018). Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos. <https://ebuah.uah.es/xmlui/handle/10017/33621>
22. Guo, X., Zhang, Y., Fan, K., Lee, C., & Wang, F. (2020). A comprehensive study of non-linear air damping and “pull-in” effects on the electrostatic energy harvesters. *Energy Conversion Management*, 203, 112264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112264>
23. Hamlehdar, M., Kasaeian, A., & Safaei, M. R. (2019). Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: A critical review. *Renewable Energy*, 143, 1826-1838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.078>
24. Han, Y., Sun, Y., & Wu, J. (2020). An efficient solar/lignite hybrid power generation system based on solar-driven waste heat recovery and energy cascade utilization in lignite pre-drying. *Energy Conversion Management*, 205, 112406. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112406>
25. Hidayanti, F., Wati, E. K., & Akbar, H. (2020). Energy Harvesting System Design for Converting Noise into Electrical Energy. *International Journal of Advanced Science Technology*, 29(03), 4791-4802. <https://n9.cl/qiy8y>
26. Hobbs, W. B., & Hu, D. L. (2012). Tree-inspired piezoelectric energy harvesting. *Journal of Fluids Structures*, 28, 103-114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.08.005>
27. Jamadar, V., Pingle, P., & Kanase, S. (2016). Possibility of harvesting Vibration energy from power producing devices: A review. 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT),
28. Jiang, W., Yuan, D., Xu, S., Hu, H., Xiao, J., Sha, A., & Huang, Y. (2017). Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. *Applied Energy*, 205, 941-950. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.091>

29. Jiménez, N., & Camarena, F. (2019). Modelización de cerámicas y transductores piezoeléctricos vibrando en espesor mediante matrices de transferencia. *Modelling in Science Education Learning*, 12(1), 87-110. <https://doi.org/10.4995/msel.2019.10803>
30. Ku, M.-L., Li, W., Chen, Y., & Liu, K. R. (2015). Advances in energy harvesting communications: Past, present, and future challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(2), 1384-1412. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2497324>
31. Kuang, Y., Chew, Z. J., & Zhu, M. (2020). Strongly coupled piezoelectric energy harvesters: Finite element modelling and experimental validation. *Energy Conversion Management*, 213, 112855. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112855>
32. Kwon, S.-D. (2010). A T-shaped piezoelectric cantilever for fluid energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 97(16), 164102. <https://doi.org/10.1063/1.3503609>
33. Li, D., Wu, Y., Da Ronch, A., & Xiang, J. (2016). Energy harvesting by means of flow-induced vibrations on aerospace vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 86, 28-62. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.08.001>
34. Li, H., Liu, D., Wang, J., Shang, X., & Hajj, M. R. (2020). Broadband bimorph piezoelectric energy harvesting by exploiting bending-torsion of L-shaped structure. *Energy Conversion Management*, 206, 112503. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112503>
35. Liu, J., Zuo, H., Xia, W., Luo, Y., Yao, D., Chen, Y., Wang, K., & Li, Q. (2020). Wind energy harvesting using piezoelectric macro fiber composites based on flutter mode. *Microelectronic Engineering*, 111333. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111333>
36. Liu, Y., Lin, R., Chen, S., & Duan, W. (2020). FEM Simulation of Ocarina-Shaped Piezoelectric Wind Energy Harvester. In *ACMSM25* (pp. 1071-1076). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7603-0\\_101](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7603-0_101)
37. Luque Forastero, A. (2019). Análisis de la respuesta de estructuras reticulares planas auxéticas fabricadas con material piezoeléctrico.

38. Ma, Z., Bao, H., & Roskilly, A. P. (2020). Electricity-assisted thermochemical sorption system for seasonal solar energy storage. *Energy Conversion Management*, 209, 112659. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112659>
39. Maamer, B., Boughamoura, A., El-Bab, A. M. F., Francis, L. A., & Tounsi, F. (2019). A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes. *Energy Conversion Management*, 199, 111973. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111973>
40. Mah, O. (1998). *Fundamentals of Photovoltaic Materials*. National Solar Power Research Institute. Inc, 12, 21-98.
41. McCarthy, J., Watkins, S., Deivasigamani, A., & John, S. (2016). Fluttering energy harvesters in the wind: A review. *Journal of Sound Vibration*, 361, 355-377. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.09.043>
42. Naranjo, C., Oyinlola, M. A., Wright, A. J., & Greenough, R. M. (2019). Experimental study of a domestic solar-assisted ground source heat pump with seasonal underground thermal energy storage through shallow boreholes. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114218. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114218>
43. Rajarathinam, M., & Ali, S. (2018). Energy generation in a hybrid harvester under harmonic excitation. *Energy Conversion Management*, 155, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.054>
44. Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 74, 590-601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
45. Setiawan, I. (2019). Studi Eksperimental Penggunaan Loudspeaker Sebagai Pengkonversi Energi Bunyi Menjadi Listrik Dalam Alat Pemanen Energi Akustik (Acoustic Energy Harvester). *Jurnal Teknologi*, 11(1), 9-16. <https://doi.org/10.24853/jurtek.11.1.9-16>
46. Shan, X., Tian, H., Chen, D., & Xie, T. (2019). A curved panel energy harvester for aeroelastic vibration. *Applied Energy*, 249, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.153>

47. Siddiqui, O., & Dincer, I. (2020). A new solar energy system for ammonia production and utilization in fuel cells. *Energy Conversion Management*, 208, 112590. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112590>
48. Sirohi, J., & Mahadik, R. (2012). Harvesting wind energy using a galloping piezoelectric beam. *Journal of vibration acoustics*, 134(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4004674>
49. Sola, A., Bougiatioti, P., Kuepferling, M., Meier, D., Reiss, G., Pasquale, M., Kuschel, T., & Basso, V. (2017). Longitudinal spin Seebeck coefficient: heat flux vs. temperature difference method. *Scientific reports*, 7, 46752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/srep46752>
50. Soto, P., Dominguez, L., & Rivera, W. (2018). Preliminary assessment of a solar absorption air conditioning pilot plant. *Case studies in thermal engineering*, 12, 672-676. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.09.001>
51. Takhedmit, H., Saddi, Z., Karami, A., Basset, P., & Cirio, L. (2017). Electrostatic vibration energy harvester with 2.4-GHz Cockcroft–Walton rectenna start-up. *Comptes Rendus Physique*, 18(2), 98-106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crhy.2016.12.001>
52. Uchino, K. (2017). *Advanced piezoelectric materials: Science and technology*. Woodhead Publishing.
53. Velasco, J., Barambones, O., Calvo, I., Sáez de Ocáriz, I., & Chouza, A. (2018). Diseño de un modelo de precisión para actuadores piezoeléctricos. *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de Septiembre de 2018*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0483>
54. Vera, Y. E. G., Pérez, L. F. S., Pardo, L. A. C., & Benavides, C. H. M. (2019). Análisis Comparativo del Rendimiento de los Módulos Fotovoltaicos Monocristalino y Policristalino bajo Condiciones Climáticas de Fusagasugá. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 24(1), 49-63. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/4988/498864120004/498864120004.pdf>

55. Wang, J., Zhou, S., Zhang, Z., & Yurchenko, D. (2019). High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments. *Energy Conversion Management*, 181, 645-652. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.034>
56. Wei, C., & Jing, X. (2017). A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 74, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073>
57. Weinstein, L. A., Cacan, M. R., So, P., & Wright, P. (2012). Vortex shedding induced energy harvesting from piezoelectric materials in heating, ventilation and air conditioning flows. *Smart Materials Structures*, 21(4), 045003. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/4/045003>
58. Wen, Q., Schulze, R., Billep, D., Otto, T., & Gessner, T. (2014). Modeling and optimization of a vortex induced vibration fluid kinetic energy harvester. *Procedia Engineering*, 87, 779-782.
59. Xie, K., Nian, Y.-L., & Cheng, W.-L. (2018). Analysis and optimization of underground thermal energy storage using depleted oil wells. *Energy Buildings*, 163, 1006-1016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.189>
60. Yang, Y., Zhao, L., & Tang, L. (2013). Comparative study of tip cross-sections for efficient galloping energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 102(6), 064105. <https://doi.org/10.1063/1.4792737>
61. Ye, T., Wang, X., Li, X., Yan, A. Q., Ramakrishna, S., & Xu, J. (2017). Ultra-high Seebeck coefficient and low thermal conductivity of a centimeter-sized perovskite single crystal acquired by a modified fast growth method. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(5), 1255-1260. <https://doi.org/10.1039/C6TC04594D>
62. Yildirim, T., Ghayesh, M. H., Li, W., & Alici, G. (2017). A review on performance enhancement techniques for ambient vibration energy harvesters. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 71, 435-449. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.073>
63. Zaldívar, O. G. (2016). Estudio de Materiales “relaxores”: Influencia de los defectos en la estructura perovskita y el carácter “relaxor”. *Anuales de la Academia de Ciencias de Cuba*. <http://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/253>

64. Zhang, H., Corr, L. R., & Ma, T. (2018). Issues in vibration energy harvesting. *Journal of Sound Vibration*, 421, 79-90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.01.057>
65. Zhao, D., Ji, C., Li, S., & Li, J. (2014). Thermodynamic measurement and analysis of dual-temperature thermoacoustic oscillations for energy harvesting application. *Energy Buildings*, 65, 517-526. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.078>
66. Zhao, F., Chen, X., Yi, Z., Qin, F., Tang, Y., Yao, W., Zhou, Z., & Yi, Y. (2020). Study on the solar energy absorption of hybrid solar cells with trapezoid-pyramidal structure based PEDOT: PSS/c-Ge. *Solar Energy*, 204, 635-643. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.030>
67. Zhao, X., Xiang, H., & Shi, Z. (2020). Piezoelectric energy harvesting from vehicles induced bending deformation in pavements considering the arrangement of harvesters. *Applied Mathematical Modelling*, 77, 327-340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.07.048>
68. Zhou, C.-F., Zou, H.-X., Wei, K.-X., & Liu, J.-G. (2019). Enhanced performance of piezoelectric wind energy harvester by a curved plate. *Smart Materials Structures*, 28(12), 125022. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab525a>