



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas



# INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS (IICBA)

## CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS (CIICAp)

### “DISEÑO DE UN COSECHADOR DE ENERGIA UTILIZANDO SENSADO PIEZOELECTRICO”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRIA EN SUSTENTABILIDAD ENERGETICA

Lic. Sahiril Fernanda Rodriguez Fuentes

Director:

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre

Codirector

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

Sinodales

Dr. Pedro Vargas Chablé

Dr. Diego Seuret Jiménez

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

Dr. José Antonio Marban

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre

CUERNAVACA, MORELOS

marzo 2024



## RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño, modelado y fabricación de un cosechador de energía con material piezoeléctrico basado en vibraciones mecánicas. Este dispositivo trabaja bajo el principio de transducción piezoeléctrica, es decir que, al deformarse mecánicamente, debido a las vibraciones genera energía eléctrica. El material piezoeléctrico usado en la fabricación fue Zirconato Titanato de Plomo (PZT), y latón como base estructural.

Se realizaron modelos de elemento finito para predecir la frecuencia del primer modo de vibración del dispositivo, y arreglos experimentales para su validación. La frecuencia de resonancia del modelo numérico y la obtenida experimentalmente (18 Hz) muestran una desviación de 0.47%, respectivamente. La potencia generada es de 0.202 mW suficiente para alimentar dispositivos de bajo consumo tales como calculadoras básicas, relojes de pulsera y transistores, entre otros.

Se implementó una parametrización de masa de prueba en el extremo fijo de los transductores piezoeléctricos para determinar el peso que debería tener cada transductor para reducir la frecuencia de resonancia con el objetivo de evitar fracturas y desgaste de los dispositivos piezoeléctricos.

Es importante mencionar que, se pueden diseñar, optimizar e implementar PVEH para alimentar a dispositivos electrónicos de baja potencia con elementos de bajo costo de implementación o reciclados.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

## ABSTRACT

This work presents the design, modeling, and fabrication of an energy harvester with piezoelectric material based on mechanical vibrations. This device works under the principle of piezoelectric transduction, i.e., when mechanically deformed, it generates electrical energy due to vibrations. The piezoelectric material used in the fabrication was Lead Zirconate Titanate (PZT), and brass as structural base.

Finite element models were performed to predict the frequency of the first vibration mode of the device, and experimental setups for validation. The resonance frequency of the numerical model and the one obtained experimentally (18 Hz) show a deviation of 0.47%, respectively. The power generated is 0.202 mW enough to power low power devices such as basic calculators, wristwatches and transistors, among others.

A test mass parameterization was implemented at the fixed end of the piezoelectric transducers to determine the weight that each transducer should have to reduce the resonance frequency to avoid fractures and wear of the piezoelectric devices.

It is important to mention that PVEH can be designed, optimized, and implemented to power low power electronic devices with low cost or recycled elements.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres quien fue mi guía durante todo el proceso de la Tesis, por darme la oportunidad de crecer junto a ella. Por ser mi amiga siempre. Gracias, mi eterna admiración.

Agradezco al doctor J Jesús Escobedo Alatorre por siempre brindarme su apoyo desde siempre.

Agradezco también al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICA p), por permitirme ser parte de su equipo.

Agradezco a mi comité tutorial conformado por Dr. Pedro Vargas Chablé, Dr. Diego Seuret Jiménez, Dra. Margarita Tecpoyotl Torres, Dr. José Antonio Marban y Dr. J Jesús Escobedo Alatorre por sus valiosas aportaciones y consejos durante este proceso.

A mis queridos compañeros de laboratorio que siempre me brindaron su apoyo, el Maestro Andrés Ferrara, por compartir su conocimiento conmigo y apoyarme cuando tenía dudas, a el Doctor Pedro Vargas Chablé y al Ing. Alan Estrada.

A CONACyT, por el apoyo obtenido como parte del proyecto de Ciencia Básica "Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEM inerciales y electro-térmicos".

"Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación", con número de referencia A1-S-33433.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



## DEDICATORIA

A mi mamá a mi hermano y a la memoria de mi padre, quien siempre fue una guía espiritual para mí, y a mi familia en general.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**





## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO .....	8
Lista de Tablas.....	11
Lista de Figuras.....	12
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Introducción .....	15
1.2 Justificación .....	17
1.3 Objetivo general .....	18
1.3.1 Objetivos particulares .....	18
1.4 Limitaciones.....	18
1.5 Antecedentes .....	19
1.6 Preguntas de investigación.....	23
1.7 Hipótesis .....	24
1.8 Planteamiento del problema.....	24
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	27
2. CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	28
2.1 Piezoelectricidad .....	28
2.2 Efecto piezoeléctrico .....	28
2.3 Principio del efecto piezoeléctrico para la recolección de energía.....	30
2.4 Dispositivos piezoeléctricos de recolección de energía .....	31
2.5 Transductores piezoeléctricos (Transductores de disco) .....	32
2.5.1 Discos piezoeléctricos .....	32
2.6 Materiales Piezoeléctricos.....	33
2.7 Conversión Piezoeléctrica .....	35
2.8 Transductores piezoeléctricos.....	35
2.8.1 Mecánica detallada de transductores piezoeléctricos .....	36
2.8.2 Ventajas y desventajas de los transductores piezoeléctricos.....	36
2.8.3 Aplicaciones .....	37
2.8.4 Aplicaciones de transductores piezoeléctricos.....	37



2.8.5 Recolección de energía .....	39
2.9 Formas de los distintos transductores comerciales .....	40
2.9.1 Transductores piezoeléctricos de disco .....	40
2.9.2 Transductores piezoeléctricos de tira .....	40
2.9.3 Transductores piezoeléctricos de anillo.....	40
2.9.4 Transductores piezoeléctricos de tubo.....	40
2.9.5 Transductores piezoeléctricos bimorfos.....	41
2.9.6 Transductores piezoeléctricos Unimorph .....	41
2.9.7 Transductores piezoeléctricos de placa y bloque .....	41
2.10 Propiedades y aplicaciones de los materiales piezoeléctricos.....	41
2.11 Cosechadores de energía .....	42
2.11.1 Cosecha de energía basado en la energía vibracional .....	42
2.12 Componentes de los materiales piezoeléctricos.....	43
2.13 Constante piezoeléctrica .....	44
2.14 Modelado matemático .....	46
2.14.1 Ecuaciones constitutivas fundamentales y coeficientes piezoeléctricos.....	46
CAPITULO 3. METODOLOGÍA .....	48
3.    CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....	49
3.1 Metodología de diseño para transductor piezoeléctrico .....	50
3.2 Metodología de diseño para un generador piezoeléctrico .....	50
4.    CAPITULO 4. MODELADO, DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS PARA COSECHAMIENTO DE ENERGÍA. ....	54
4.1 Caracterización de material utilizado.....	54
4.2 Configuración preliminar de un sistema de cosechador de energía.....	59
4.3 Posibles aplicaciones y fuentes externas .....	63
4.4 Cosecha de energía basado en la energía de las vibraciones .....	66
4.5 Resultados preliminares obtenidos mediante frecuencia moderada .....	66
4.5 Implementación de mejoras en el desarrollo de un cosechador de energía utilizando transductores piezoeléctricos. ....	75
5.    CAPITULO 5. Dispositivo cosechador de energía .....	84
5.1 Transductores piezoeléctricos trapezoidales.....	84



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

5.2 Análisis de elementos finitos y análisis modal en ANSYS Workbench. ....	84
5.3 Caracterización de un transductor piezoeléctrico trapecoidal .....	89
5.4 Configuración de la propuesta mejorada de un sistema de cosechador de energía .....	93
6. CAPÍTULO 6. RESULTADOS .....	100
6.1 Resultados .....	100
7. CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	105
7.1 Conclusiones.....	105
8. Bibliografía .....	106
9. ANEXOS .....	113
A. 1 Publicaciones.....	113
A.2 Reconocimientos.....	115
A3. Estancia .....	117
A4. Talleres .....	118



Lista de Tablas

Tabla 4.1 Parámetros geométricos y eléctricos del transductor piezoeléctrico. .... 55

Tabla 4.2 Calculo de masa de los elementos que conforman al transductor piezoeléctrico para las distintas geometrías..... 58

Tabla 4.3 Dispositivos que requieren bajo consumo..... 63

Tabla 4.4 Características de las distintas fuentes de energía disponibles en el entorno y potencia cosechada (Vullers et al., 2009). .... 65

Tabla 4.5 Resultados obtenidos para diferentes geometrías. .... 66

Tabla 4.6 Resultados obtenidos para transductor circular. .... 67

Tabla 4.7 Resultados obtenidos para transductor con corte sin orillas..... 68

Tabla 4.8 Resultados obtenidos para transductor con corte de viga en voladizo. .... 69

Tabla 4.9 Fuentes de energía disponibles en el entorno (Wei & Jing, 2017). .... 75

Tabla 4.10 Dimensiones y características del transductor y la masa de prueba. .... 76

Tabla 4.11 Resultados obtenidos aplicando masa de prueba. .... 77

Tabla 4.12 Amplitud y frecuencia de algunas fuentes de vibración (Roundy et al., n.d.; Toshiyoshi et al., 2019). .... 79

Tabla 4.13 Consumo de potencia, corriente y voltaje de algunos dispositivos (Toshiyoshi et al., 2019), (Vullers et al., 2009)..... 81

Tabla 5.1 Parámetros utilizados para obtener las formas modales del microgenerador piezoeléctrico (Valdez & Casali, 2018), (Nazeer et al., 2009), (Tseng et al., 2013), (Nia et al., 2018). .... 85

Tabla 5.2 Comparación de materiales respecto a la primera forma modal. .... 88

Tabla 5.3 Resultados obtenidos para transductor trapezoidal..... 89

Tabla 6.1 Resultados obtenidos para arreglo de transductores piezoeléctricos trapezoidales. ... 100

Tabla 6.2 Resultados obtenidos para un arreglo de 4 transductores de forma trapezoidal. .... 104



Lista de Figuras

Figura 2.1 Efecto piezoeléctrico, directo e indirecto. Adaptado de (Mishra et al., 2019)..... 29

Figura 2.2 Representación del cambio en la estructura cristalina a) Material con centro simétrico, b) Material con centro no simétrico. Adaptado de (Venet Zambrano et al., n.d.) ..... 30

Figura 2.3 Respuesta de una pieza de cerámica piezoeléctrica a la estimulación mecánica externa (Cook-Chennault et al., 2008). ..... 31

Figura 2.4 Estructura de un actuador piezoeléctrico Adaptado de (Pi, n.d.)..... 33

Figura 2.5 Sistema de coordenadas Ortogonal para describir las propiedades de una cerámico piezoeléctrico. El vector de polarizaciones paralelo al eje 3 (Z), adaptado de (Al-Yafeai et al., 2020). ..... 44

Figura 2.6 a) modo 31 (longitudinal), b) modo 33 (transversal), adaptado de (Al-Yafeai et al., 2020). ..... 45

Figura 3.1 Proceso de modificación de geometría. .... 50

Figura 3.2 Proceso de diseño para un generador piezoeléctrico. .... 51

Figura 3.3 Proceso de corte en una máquina de Control Numérico Computarizado..... 52

Figura 4.1 Transductor piezoeléctrico. a) Representación esquemática de los diámetros. b) Transductor comercial. .... 54

Figura 4.2 Proceso de cortes en CNC. .... 56

Figura 4.3 Transductores piezoeléctricos. a) Vista esquemática transversal, b) vista frontal, c) forma circular, d) forma rectangular y e) forma trapezoidal..... 58

Figura 4.4 Estación de pruebas para cosechamiento de energía. .... 60

Figura 4.5 Frequency Generator (software de licencia libre)..... 60

Figura 4.6 Base para sujeción de transductor piezoeléctrico a) Estructura en Solidworks, b) vista desde arriba, c) vista frontal. .... 62

Figura 4.7 Circuito rectificador (Elaboración propia)..... 62

Figura 4.8 Resultados para transductor circular. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificado, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificado con carga, d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente. .... 71

Figura 4.9 Resultados para transductor circular sin orillas. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificado, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificado con carga, d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente. .... 72

Figura 4.10 Resultados para transductor de viga en voladizo. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificado, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificado con carga, d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente. .... 74

Figura 4.11 (a) Masas de prueba independientes, (b) Geometría con mejor desempeño, con 5 masas de prueba apiladas..... 76

Figura 4.12 Frecuencia vs voltaje Pico-Pico (aplicando masa de prueba). .... 78

Figura 4.13 Prueba de Dispositivo cosechador encendiendo 3 Leds..... 79

Figura 4.14 Secciones del arreglo experimental que pueden ser mejorados..... 82

Figura 5.1 Primeros cuatro modos de vibración del generador piezoeléctrico basado en vibraciones utilizando PZT: a) primer modo (18.089 Hz), b) segundo modo (121.22 Hz), c) tercer modo (394.02 Hz) y d) cuarto modo (1082.1 Hz). .... 86



Figura 5.2 Primeros cuatro modos de vibración del generador piezoeléctrico basado en vibraciones utilizando AIN. .... 87

Figura 5.3 Primeros cuatro modos de vibración del generador piezoeléctrico basado en vibraciones utilizando ZnO..... 88

Figura 5.4 Resultados obtenidos para transductor trapezoidal. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificado, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificado con carga (1kΩ), d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente..... 92

Figura 5.5 a) Arreglo preliminar con el transductor piezoeléctrico optimizado, b) 6 Leds encendidos a una frecuencia de resonancia de 75 Hz..... 93

Figura 5.6 Diagrama esquemático. .... 94

Figura 5.7 Arreglo experimental. .... 95

Figura 5.8 Proceso del circuito realizado en Proteus. a) Pistas generadas en el software, b) simulación del circuito, c) imagen vectorizada para grabado en CNC y d) circuito final con sus respectivos componentes. .... 96

Figura 5.9 Arreglo experimental final. .... 97

Figura 5.10 Base de soporte en PLA para un arreglo de 4 transductores trapezoidales. .... 97

Figura 6.1 Potencia de salida del recolector de energía utilizado para energizar (a) un reloj de pulsera, (b) 24 LEDs, (c) una calculadora básica, (d) termómetro y (e) foco Led. .... 103



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



# CAPITULO 1.

# INTRODUCCIÓN



## 1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

MEMS son las siglas en inglés de Microelectronicmechanical System y se utilizan para crear una amplia gama de dispositivos diferentes, tales como acelerómetros, osciladores, temporizadores y detectores (Deng et al., 2021), (Erturk & Inman, 2009a), (Leadenham & Erturk, 2015),(Kouravand, 2011).

Recientemente, las tecnologías MEMS se han aplicado al desarrollo de cosechadores de energía integrados, y se han desarrollado muchos cosechadores MEMS piezoeléctricos. Cabe señalar que, otros dispositivos MEMS piezoeléctricos que se han desarrollado incluyen además de la recolección de energía, la detección, la transducción ultrasónica, los micrófonos y los actuadores, lo cuales, se pueden fabricar en el proceso PiezoMUMPs. Además, debe mencionarse que este proceso es de alto costo y que, en México, aun no se trabajan este tipo de procesos.

Los cosechadores MEMS piezoeléctricos representan una alternativa de recolección de energía rentable, si puede cumplirse con los requisitos de densidad de potencia y ancho de banda. Tres atributos principales para hacer la recolección de energía piezoeléctrica MEMS en aplicaciones reales son el costo del sistema, la potencia normalizada y el rango de frecuencia operacional (ancho de banda y frecuencia central).

Los cosechadores de energía piezoeléctrica pueden ser categorizados por sus fuentes de energía, como vibraciones ambientales, impactos, fluidos y fuerza humana. Independientemente de la vibración generada por las fuentes de energía, el principio de funcionamiento básico es el mismo. El entorno aplica un esfuerzo sobre el material piezoeléctrico, y por el efecto piezoeléctrico directo, la energía mecánica de entrada se convierte en energía eléctrica.

Los materiales piezoeléctricos pueden utilizarse para convertir la energía mecánica oscilante en energía eléctrica. Esta tecnología, junto con diseños



innovadores de acoplamiento mecánico, puede constituir la base para la recolección de energía a partir del movimiento mecánico.

El efecto piezoeléctrico convierte el esfuerzo mecánico en tensión eléctrica. Este esfuerzo puede provenir de muchas fuentes diferentes como son: el movimiento del hombre, las vibraciones sísmicas de baja frecuencia y el ruido acústico son algunos ejemplos. El efecto piezoeléctrico puede aplicarse para recoger la energía mecánica de la marcha. Esta energía puede convertirse en energía eléctrica útil que puede utilizarse para alimentar dispositivos electrónicos portátiles, como sensores y receptores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

La recolección de energía piezoeléctrica también puede utilizarse para alimentar directamente algunos dispositivos electrónicos de consumo, como teléfonos móviles, comunicadores bidireccionales etc. Recientemente se han desarrollado generadores de prueba de concepto para convertir la energía mecánica de la marcha en energía eléctrica. Cada generador de impacto en el talón utiliza cuatro elementos piezoeléctricos (cada uno de los cuales es una pila de cristales bimorfos de Zirconato Titanato de Plomo (PZT-5A)) para convertir el movimiento mecánico en energía eléctrica en el factor de forma del talón de una bota, donde a medida que el usuario camina se genera energía eléctrica (Howells, 2009),(Nia et al., 2018). Se ha reportado en la literatura también el uso de cosechadores de energía piezoeléctricos en lavadoras domésticas (Elvira-Hernández et al., 2020).

La captación de energía por vibración consiste en recuperar la energía cinética del entorno transformándola en energía eléctrica mediante dispositivos electromagnéticos, electrostáticos o piezoeléctricos (Friswell & Adhikari, 2010),(Beeby et al., 2006).

Debido a su eficacia, ligereza y pequeño tamaño, los dispositivos piezoeléctricos se utilizan ampliamente como alternativa a las baterías en dispositivos de baja potencia (Litak et al., 2010) . Los materiales piezoeléctricos



pueden integrarse en estructuras ligeras, como vigas y placas, para convertir la energía eléctrica en energía mecánica (modo actuador) o la energía mecánica en energía eléctrica (modo sensor o modo de recolección de energía de vibración).

Este estudio se centra en el diseño un dispositivo para recolección de energía que tiene como objetivo utilizar un material piezoeléctrico, donde los atributos clave para hacer un buen cosechador de energía MEMS piezoeléctrico es incluir su tamaño reducido (nivel de compactación), voltaje de salida, ancho de banda, frecuencia de funcionamiento, amplitud de vibración de entrada, vida útil y costo.

## 1.2 Justificación

La recolección de energía es un área de investigación de gran interés para la comunidad científica, constituye una forma sencilla y sostenible de recolectar energía de fuentes disponibles en el medio ambiente (luz, calor, viento, gradientes de salinidad y energía cinética derivada de la marcha humana o de los movimientos de los vehículos (Liu et al., 2018; Narita & Fox, 2018; Shepelin et al., 2019)). Nuestro enfoque se centra en los cosechadores de energía vibracional, conocidos como VEHs, por las siglas en inglés, de Vibration Energy Harvesters.

La generación de know-how para fabricar cosechadores de energía piezoeléctricos (PEHs, por sus siglas en inglés), en particular, en escala meso, de acuerdo con nuestra infraestructura física, es indispensable para poder generar prototipos de bajo costo, que apoyen para satisfacer la necesidad de complementar las fuentes de alimentación eléctrica, enfocándose en los dispositivos de bajo consumo energético, tales como aquellos que se utilizan en iluminación de bajo perfil, en deporte, en uso médico y en monitoreo, entre otros.

Por otro lado, la generación de diseños en microescala es también importante, ya que este tipo de diseños, se encuentran también en la frontera del conocimiento, siendo factible el escalamiento. Cabe señalar, que en Centros como CIDESI Querétaro, se cuenta con cuarto limpio, siendo posible la fabricación de Circuitos Integrados, y actualmente, se está desarrollando know-how para la



fabricación de Sistemas Microelectromecánicos. Además, consideran en un futuro, la posibilidad de fabricar microdispositivos con capas piezoeléctricas.

La recolección consiste en capturar la energía de diferentes fuentes ambientales, antrópicas y convertirla en energía eléctrica que puede utilizarse para alimentar tecnología portátil, las redes de sensores o almacenarse para la producción de energía a gran escala (Covaci & Gontean, 2020),(Akin-Ponnle & Carvalho, 2021).

En (Renaud et al., 2012), menciona que los recolectores de energía de vibración pueden reemplazar las baterías, además de servir como fuentes de energía limpia y renovable en aplicaciones inalámbricas de bajo consumo. Por otro lado, se ha reportado que el tiempo de vida útil utilizando el efecto piezoeléctrico es mayor que otras opciones y genera una potencia también mayor (Mishra et al., 2019).

Hay varias alternativas de cosechamiento de energía utilizando dispositivos MEMS como las ya mencionadas anteriormente.

### 1.3 Objetivo general

Diseñar un dispositivo para recolección de energía basado en un material piezoeléctrico.

#### 1.3.1 Objetivos particulares

- Seleccionar materiales piezoeléctricos, por disponibilidad y por sustentabilidad.
- Validar, diferenciar y caracterizar mediante simulación las estructuras bicapa.
- Analizar y diseñar el actuador.
- Caracterizar su funcionamiento con el apoyo de software. Modelar, simular y optimizar el dispositivo.

### 1.4 Limitaciones

- La tecnología de fabricación PiezoMUMPS es de alto costo, y los laboratorios en el país, aun no implementan capas piezoeléctricas.
- No se cuenta con software especializado para el diseño de estructuras MEMS, tales como Coventor.



### 1.5 Antecedentes

En (Litak et al., 2010), menciona que Un dispositivo común utiliza el efecto piezoeléctrico para vigas en voladizo en resonancia para recolectar energía de vibración ambiental. Sin embargo, la mayoría de estos dispositivos tienen un parche piezoeléctrico rectangular que cubre todo o parte del haz. Este documento considera el diseño óptimo de un dispositivo de este tipo y, en particular, investiga el efecto que tiene el tamaño y la forma del sensor piezoeléctrico en la energía recolectada. Se muestra que se pueden obtener aumentos significativos en la energía recolectada optimizando el diseño del sensor. Al igual que (Nia et al., 2018), menciona de igual forma que un dispositivo común utiliza el efecto piezoeléctrico para vigas en voladizo en resonancia para recolectar energía de vibración ambiental, en este trabajo considera el diseño óptimo de un recolector de energía.

Los principales mecanismos para la recolección de energía cinética son piezoeléctricos, electromagnéticos, electrostáticos o mediante el uso de materiales magnetostrictivos. Es importante mencionar que existen métodos de recolección de energía, en (Covaci & Gontean, 2020), revisa los métodos actuales de recolección de energía, mientras se enfoca en la recolección de energía piezoeléctrica. La técnica de captación de energía piezoeléctrica se basa en la propiedad de los materiales de generar un campo eléctrico cuando se les aplica una fuerza mecánica. Este fenómeno se conoce como efecto piezoeléctrico directo.

Existen una gran investigación de recolectores de energía, utilizando materiales piezoeléctricos en (Anton & Sodano, 2007), realiza una recopilación de recolectores de energía, coincidiendo en que es ampliamente utilizado geometrías rectangulares com(Mohammadi et al., 2002), desarrolla un recolector de energía utilizando PZT (Titanato Zirconato de Plomo), recolectando 120 mW. Existen aplicaciones que consisten en recolectar la energía, como se mencionó anteriormente de fuentes como el ambiente, impactos, fuerzas externas, pro también se puede recolectar energía de la marcha humana, en (Izadgoshasb et al., 2018), que evalúa el potencial de una viga en voladizo con un parche piezoeléctrico adjunto al final del voladizo para recolectar energía del movimiento humano.



Es importante mencionar que los materiales seleccionados son de suma importancia, ya que en conjunto con la constante piezoeléctrica de los materiales ayudará a que entre más grande sea esta constante, más energía podrá recolectar. En (Elvira-Hernández et al., 2020), desarrolla un nanogenerador piezoeléctrico basado en vibraciones compuesto por una viga de doble sujeción con cinco secciones transversales multicapa. Este diseño de nanogenerador tiene una masa sísmica central (910  $\mu\text{m}$  de espesor) y un sustrato (125  $\mu\text{m}$  de espesor) de tereftalato de polietileno (PET), así como una película de óxido de zinc (100 nm de espesor) en la parte inferior de cada extremo. Las películas de óxido de zinc (ZnO) tienen dos electrodos de aluminio (100 nm de espesor) a través de los cuales se extrae la energía eléctrica generada. Finalmente, en (Toprak & Tigli, 2015), se enfoca en el diseño, la fabricación y la caracterización del rendimiento de recolectores piezoeléctricos de energía (PEH) de tipo voladizo a escala de sistemas microelectromecánicos (MEMS) que utilizan el polímero piezoeléctrico polivinilideno fluoruro-trifluoroetileno (PVDF-TrFE).

Los dispositivos diseñados se fabricaron utilizando técnicas de fabricación MEMS estándar. Los electrodos se formaron con películas delgadas de Al y Ti/Al pulverizadas, y se depositó una película de PVDF-TrFE de 1.3  $\mu\text{m}$  de espesor mediante recubrimiento por rotación. Los voladizos se suspendieron mediante un proceso de dos pasos: DRIE en la parte posterior para realizar el grabado a granel, seguido de grabado gaseoso XeF<sub>2</sub> para la liberación final. La polarización remanente y el campo coercitivo de los dispositivos fabricados se midieron como 6.1  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  y 74.9 V/ $\mu\text{m}$ , respectivamente. Los rendimientos piezoeléctricos se evaluaron mediante un tipo de medición de pulsar y soltar. Para estas mediciones, se usaron puntas de sonda hechas a medida unidas a microposicionadores. En función de los resultados experimentales, la potencia de salida máxima se calculó en 35.1 pW para un desplazamiento máximo de la punta de 500  $\mu\text{m}$  desde un voladizo de 1200  $\mu\text{m}$  x 300  $\mu\text{m}$ .

Los ejemplos de aplicaciones de los dispositivos piezoeléctricos abarcan desde obleas de PZT, que alimentan a los LEDs de calzado de niños, hasta elementos que alimentan a sistemas microelectromecánicos (MEMS). Las obleas



PZT de los zapatos pueden generar 1.3 mW a 3 V al caminar, a una frecuencia de carga de 0.8 Hz (Platt, Farritor, & Haider, 2005). El tamaño del piezoeléctrico es relativamente grande, por lo que, pudiera ser substituida por un arreglo compacto.

Por otro lado, la cantidad de energía eléctrica necesaria para hacer funcionar a MEMS suele ser del orden de  $\mu\text{W}$ . En (Ma et al., 2021), se alimentó un MEMS con un cosechador piezoeléctrico (PEH) de diseño en voladizo, que generó 0.346  $\mu\text{W}$ , excitado a una  $f= 112.3$  Hz.

Los PEH pueden alimentar dispositivos directamente o a través de una batería o un capacitor. Otro estudio demostró que una batería de 40 mAh puede cargarse eficazmente en un periodo de tiempo corto, a partir de un PEH sometido a vibraciones (Sodano et al., 2005).

Se han explorado materiales no contaminantes, además de ZnO, tales como AlN (Andosca et al., 2012; Marzencki et al., 2008), Au, Ag y grafeno (Institute of Electrical and Electronics Engineers & IEEE Robotics and Automation Society, n.d.; Kurmendra & Kumar, 2017; L. T. Lee et al., 2018). Sobre diferentes geometrías para EH, en (Deng et al., 2021; Erturk & Inman, 2009b; Leadenham & Erturk, 2015) se presentan ejemplos de cantilévers bimorfos, mientras que en (S, n.d.), se muestran arreglos de cantilévers en un soporte. Además, en (Costanzo et al., 2016), se muestra una geometría fractal plana, y en (Kim et al., 2011), arreglos en estructuras similares a árboles.

Un estudio en Virginia Tech se evaluó 9 diseños de PEH, generando una potencia media de 3.1 mW por paso de vehículo. Se concluyó que, la conexión en paralelo entre los discos piezoeléctricos es más eficiente que en serie. Esta configuración permite picos de voltaje de salida más bajos y, una menor impedancia de adaptación para maximizar la potencia (Platt, Farritor, Garvin, et al., 2005; Xiong, 2014).

En (H. Yang et al., 2017), se desarrolló una carcasa prototipo de PEH hecha de MC Nylon® con 9 pilas de PZT, produciendo un voltaje de circuito abierto de 280 V. En (Jiang et al., 2014), utilizaron pilas de PZT de 36 capas de discos



piezoeléctricos en paralelo, generando 85 mW, con una fuerza de excitación de 1360 N a 6 Hz.

En (Roshani et al., 2016), se probó un material piezoeléctrico, mostrando que el efecto de la temperatura ambiente no es significativo en la potencia de salida de su PEH.

Se encuentran reportadas geometrías basadas en cantilevers bimorfos (Deng et al., 2021; Erturk & Inman, 2009b; Leadenham & Erturk, 2015), así como arreglos basados en diversas geometrías, incluyendo fractales, lo que, nos permite observar la pertinencia de la propuesta, en un área con tendencia creciente. Sobre la viabilidad no se hallaron reportes. Sobre los materiales, se reportan trabajos a nivel micrométrico en substratos de polisilicio y silicio, donde los materiales piezoeléctricos más utilizados son PZT, AlN y ZnO (Kang et al., 2016; Marzencki et al., 2008; Minh et al., 2013), en escala meso, entre los substratos reportados se encuentra el Aluminio, y materiales flexibles generalizados (con escasos detalles), y con materiales piezoeléctricos similares a los reportados en escala micro.

En (J. Wang et al., 2021) se presenta un dispositivo termoeléctrico, cuya función es generar energía a partir del calor, se utiliza en topes y en fuentes donde exista la generación de calor, en esta misma literatura se propone un piezoeléctrico con material PVDF, donde a partir de esfuerzos y vibraciones mecánicas por medio de una interfaz electrónica de sensores, se realiza el monitoreo del tráfico para adquisición de parámetros puntuales, tales como potencia, frecuencia y presión, además, se propone un dispositivo fotovoltaico de celdas PV con aplicaciones múltiples basadas en su gran densidad de potencia. En (Andosca et al., 2012), se propone un elemento cantiléver multimorfo elaborado con Nitruro de Aluminio, donde se genera energía a partir de la vibración, está desarrollado con microfabricación. Los resultados se encuentran entre 32 y 128  $\mu$ W con frecuencias de  $58 \pm 2.0$  Hz en 0.7 g, para aplicaciones en Radiofrecuencia.



En (Elfrink et al., 2009) se realiza la implementación de un cosechador de energía con un cantiléver de Nitruro de Aluminio para generación de energía a partir de la vibración, fabricado mediante deposición por pulverización, dispone de una potencia de  $60 \mu\text{W}$  con rangos de frecuencia entre 200-1200 Hz. En la misma línea de generación de energía se encuentra (Isarakorn et al., 2011), donde se utiliza un cantiléver como elemento cosechador, fabricado con películas delgadas por crecimiento epitaxial de  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ , PZT, sobre Silicio, en el extremo de este dispositivo se encuentra acoplada una masa de prueba, que permite obtener una potencia de  $13 \mu\text{W/g}^2$ , con un nivel de voltaje de  $0.27 \text{ V/g}$ , a una frecuencia de 2300 Hz. Este dispositivo tiene la intención de ser aplicado para altas potencias y corriente con voltajes bajo cargas resistivas. Otra de las investigaciones pertinentes en la ejecución de la idea de este proyecto es la presentada en (H. Lee et al., 2019), donde el dispositivo es fabricado por el proceso electrospinning SOI-Gel con PZT textil de aleación Zirconato Titanato de Plomo ( $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ ), donde la principal generación de energía es a partir de la deformación, generando una potencia de  $1.1 \mu\text{W}$ , enfocado en aplicaciones para orientaciones de las fibras.

Finalmente, en (B. S. Lee et al., 2009) y (Marzencki et al., 2008) se presentan dispositivos fabricados por procesos de microfabricación sobre Silicio, donde utilizan al Nitruro de Silicio como elemento activo aprovechando la vibración para generar energía en potencias que van de  $2765 \mu\text{W}$  y  $0.030 \mu\text{W}$  además de niveles de voltaje de 1.792 V y 3 V, con aplicaciones para medios de aceleración de 2g y para cargar microbaterías o supercapacitores, respectivamente.

## 1.6 Preguntas de investigación

- 1- ¿Es posible implementar un cosechador de viga en voladizo de energía, utilizando materiales de bajo costo?
- 2- ¿La geometría de una viga en voladizo será importante en el desempeño del actuador?
- 3- ¿Un actuador de viga en voladizo tricapa sería mejor opción?



4.- ¿Es posible tener diferentes fuentes en las que sea posible que le actuador pueda realizar su función?

### 1.7 Hipótesis

Si diseñamos un actuador con materiales de bajo impacto en el medio ambiente, es decir, que tiene un efecto reducido en el entorno natural, se puede generar un cosechador con parámetros de desempeño eficientes.

### 1.8 Planteamiento del problema

Ante el cambio climático inminente, el uso de energías verdes es una necesidad global, ya que se enfrenta día a día la necesidad de movilidad, de iluminación, de energía eléctrica para alimentar dispositivos y equipo de alto y bajo consumo por la población que ha crecido de manera desmesurada.

La evolución tecnológica hace necesario el uso de fuentes alternativas de energías no contaminantes para reducir el impacto ambiental y la degradación de recursos (Asad Sarwar Qureshi & Nawab, n.d.) en particular para alimentar a dispositivos electrónicos de bajo consumo indispensables en las sociedades 5.0 (sociedades centradas en el ser humano) como alternativa al uso de baterías.

La primera observación de la recolección de energía en forma de corriente, a partir de una fuente natural fue realizada en 1826. Thomas Johann Seebeck descubrió que la corriente fluye en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes, cuando se mantienen a diferentes temperaturas (Harb, 2011). Actualmente, los cosechadores de energía (EHs) pueden utilizarse para la alimentación de dispositivos de diversa índole, incluyendo la médica, generando energía, incluso a partir del movimiento del cuerpo humano, generando, en su caso, sistemas autónomos de bajo consumo.

Al siglo XXI se le llama "El siglo de la gestión medioambiental". Aunque la mayoría de los principales países dependen actualmente de los combustibles fósiles y de las centrales nucleares, el desarrollo de las energías renovables se vuelve importante para complementar la deficiencia energética (Uchino, 2018).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

La energía cinética es especialmente adecuada, por su accesibilidad, suele estar presente en forma de vibraciones, desplazamientos o fuerzas aleatorias. Las vibraciones del entorno se distribuyen de forma generalizada por debajo de 100 Hz. Dado que, los convertidores accionados por vibraciones proporcionan la máxima potencia cuando funcionan en resonancia, es deseable diseñar estructuras multifrecuencia en el rango mencionado. Los EHs piezoeléctricos han sido los más estudiados por su configuración sencilla y su alta eficiencia de conversión (Castagnetti, 2011).

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de un cosechador de energía basado en vibraciones, utilizando el efecto piezoeléctrico indirecto.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



# CAPÍTULO 2.

# MARCO TEÓRICO

## 2. CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad es una propiedad de ciertos materiales que generan una diferencia de potencial al deformarse mecánicamente. Cuando no se aplica un esfuerzo mecánico a un material piezoeléctrico, sus cargas positivas y negativas se distribuyen uniformemente por lo que no se presenta una diferencia de potencial. Para que la energía eléctrica se produzca debe haber una perturbación del equilibrio de carga dentro de la red cristalina de este tipo de materiales.

### 2.2 Efecto piezoeléctrico

El nombre "piezo" deriva del griego, que significa "presionar"; en una terminología moderna, el efecto considera fenómenos eléctricos y elásticos (Kong et al., n.d.).

La piezoelectricidad fue descubierta por los hermanos Curie (Curie & Curie, 1880) y en el último cuarto del siglo XIX creció rápidamente como un nuevo campo de investigación. En 1880, Pierre y Jacques Curie descubrieron que en ciertos materiales como "zinc blenda" (esfalerita o blenda que es un mineral del sulfuro de zinc), el topacio y el cuarzo, las tensiones mecánicas iban acompañadas de una polarización macroscópica y, por lo tanto, de la producción de cargas eléctricas superficiales, a partir de consideraciones de la termodinámica. Lippmann (Lippmann, 1882), predijo el efecto inverso: un esfuerzo impuesto produce deformaciones mecánicas o tensiones en el material. El descubrimiento de un fuerte efecto piezoeléctrico en el fluoruro de polivinilideno (PVDF), por (Kawai1969, n.d.), añadió muchas aplicaciones en las que se destacan propiedades como la flexibilidad mecánica.

Desde entonces, la llegada de los materiales piezoeléctricos artificiales amplió el campo de aplicaciones y los dispositivos basados en la piezoelectricidad se utilizan en hidrófonos, micrófonos, sistemas de encendido piezoeléctrico, acelerómetros y transductores ultrasónicos.

En la actualidad, las aplicaciones de materiales inteligentes piezoeléctricos para el control de las vibraciones, aplicaciones aeroespaciales, astronáuticas de superficies, estructuras flexibles, sensores para aplicaciones robóticas y aplicaciones novedosas para la reducción de las vibraciones en equipos deportivos como (raquetas de tenis y tablas de snowboard).

Recientemente, las áreas de utilización recientes, de rápido crecimiento son la memoria no volátil y la incorporación integral de microestructuras de actuación mecánica, así como de accionamiento mecánico y detección (por ejemplo, dispositivos POSFET) en los chips electrónicos.

El efecto piezoeléctrico es la separación de carga dentro de un material como resultado de una deformación aplicada (Z. L. Wang & Song, 2006).

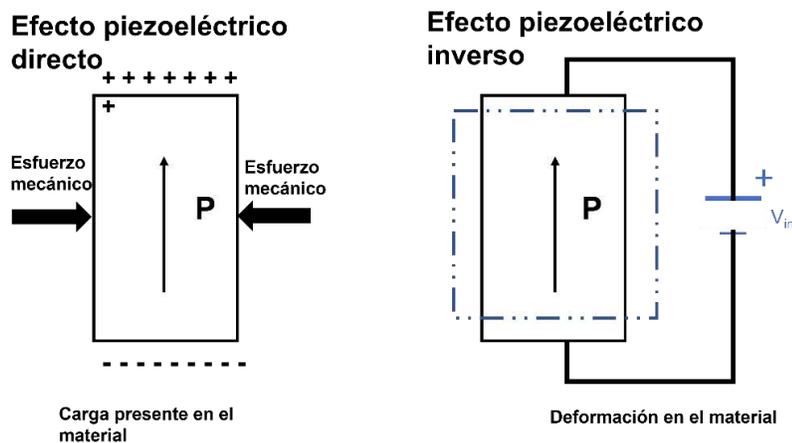


Figura 2.1 Efecto piezoeléctrico, directo e indirecto. Adaptado de (Mishra et al., 2019).

El fenómeno piezoeléctrico ocurre cuando se transforma un esfuerzo mecánico en energía eléctrica, mientras que el fenómeno piezoeléctrico inverso transforma energía eléctrica en movimiento mecánico como se observa en la Figura 2.1.

La piezoelectricidad se produce cuando los átomos forman una estructura cristalina sin centro de simetría, éstos son sometidos a tensión o compresión, por lo que el arreglo de átomos cambia ligeramente como se observa en la Figura 2.2,

provocando una polarización de los átomos que forman la estructura cristalina, esta polarización es directamente proporcional a la fuerza ejercida ( $P_i$ , n.d.).

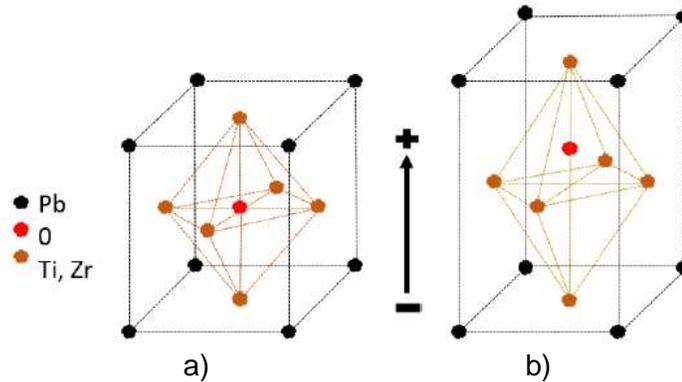


Figura 2.2 Representación del cambio en la estructura cristalina a) Material con centro simétrico, b) Material con centro no simétrico. Adaptado de (Venet Zambrano et al., n.d.).

### 2.3 Principio del efecto piezoeléctrico para la recolección de energía

El aprovechamiento de la energía mecánica consiste en convertirla en energía eléctrica, lo que requiere un sistema mecánico que acople el movimiento o la vibración a un mecanismo de transducción. El sistema mecánico debe estar diseñado para poder maximizar el acoplamiento entre las fuentes de energía mecánica y el mecanismo de transducción, en función de las características de los movimientos del entorno. Por ejemplo, la energía debida a las vibraciones puede convertirse utilizando generadores de inercia, con el componente mecánico unido a un marco inercial que actúa como referencia fija (Kong et al., n.d.).

Algunos materiales también presentan el efecto piezoeléctrico inverso, es decir, se produce una deformación mecánica en el material cuando se aplica un esfuerzo a través de los electrodos. La deformación generada de este modo podría utilizarse, por ejemplo, para desplazar una carga mecánica acoplada. Esta forma de transformar la energía eléctrica en energía mecánica utilizable es fundamental para las aplicaciones como dispositivos de nanoposicionamiento.

#### 2.4 Dispositivos piezoeléctricos de recolección de energía

Los materiales piezoeléctricos pueden producir cargas eléctricas cuando son sometidos a cargas mecánicas externas. La Figura 2.3 muestra el principio de funcionamiento de un material piezoeléctrico. La magnitud y la dirección de la corriente eléctrica están determinadas por la magnitud y la dirección del esfuerzo/deformación mecánica externa aplicada a los materiales (Kong et al., n.d.).

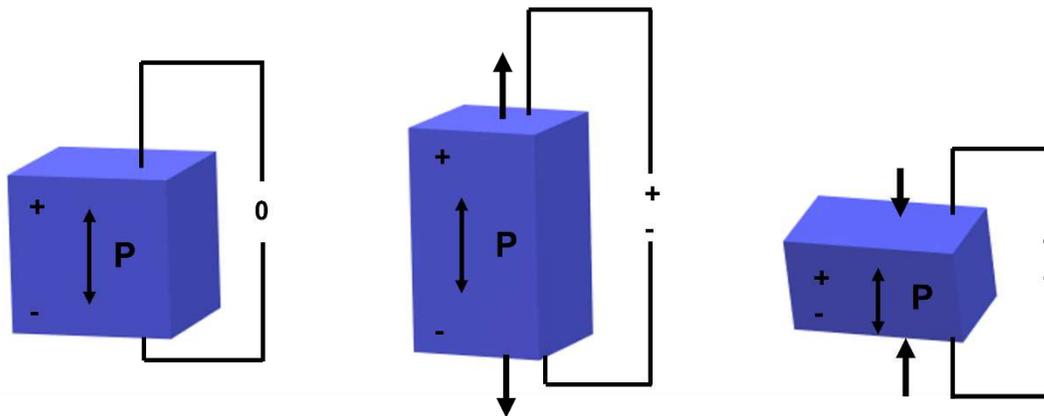


Figura 2.3 Respuesta de una pieza de cerámica piezoeléctrica a la estimulación mecánica externa (Cook-Chennault et al., 2008).

Entre las diferentes estructuras piezoeléctricas para captadores de energía, las vigas en voladizo con una o dos láminas cerámicas piezoeléctricas, que se denominan unimorfo y bimorfo, respectivamente, son las más simples. Cabe señalar que, la viga cosechadora se coloca sobre un soporte vibrante, donde el esfuerzo dinámico inducido en la(s) capa(s) piezocerámica(s) da lugar a una salida de voltaje alterno a través de sus electrodos. Cuando se aplica un movimiento armónico de la base a la estructura, se produce una salida de voltaje alterno.

Las estructuras de vigas se utilizan generalmente para niveles de esfuerzo bajos, mientras que para niveles de esfuerzo altos niveles, se prefiere otro tipo de dispositivo, compuestos de cerámica y metal.

Los compuestos metálicos generalmente tienen un diseño simple con una placa frontal de metal, llamada caparazón o capuchón, que se acopla tanto a la cerámica como al medio que la rodea. El componente metálico transfiere el



esfuerzo incidente a la cerámica o el desplazamiento al medio. En los transductores de flexión, la vibración de flexión de la cubierta metálica provoca una vibración de extensión (o contracción) del elemento piezoeléctrico.

## 2.5 Transductores piezoeléctricos (Transductores de disco)

### 2.5.1 Discos piezoeléctricos

Los discos piezoeléctricos se pueden fabricar de dos maneras: unimorfos y bimorfos. Los unimorfos se componen de una capa piezoeléctrica activa y una capa no activa, mientras que los discos piezoeléctricos bimorfos se componen de dos capas piezoeléctricas activas. Las caras del disco piezoeléctrico están metalizadas y las capas están unidas con un sustrato conductor o no conductor, que actúa como base y estabilizador para el disco circular piezoeléctrico como se puede observar en la Figura 2.4. Los monomorfos se deforman en una sola dirección cuando se activan para generar la salida mecánica o eléctrica deseada (Circular Piezo Ceramic Actuators (Unimorph and Bimorph Actuator, n.d.).

Los piezoeléctricos bimorfos están contruidos con dos capas de cerámica piezoeléctrica activa con un sustrato de metal pasivo intercalado en el medio. Cuando se aplica un voltaje, el disco piezoeléctrico se deforma o se contrae, doblando el metal con él.

El mayor desplazamiento se produce en el centro del disco piezocerámico, formando una cúpula o cuenco. Cuando se libera esta corriente, el metal vuelve a su estado original. Los discos cerámicos piezoeléctricos son pequeños, delgados, livianos y silenciosos son altamente eficientes con bajo consumo de energía y rápido tiempo de respuesta.

Los discos piezoeléctricos se metalizan, puede ser mediante un proceso físico o químico, y posteriormente se polarizan. La metalización se lleva a cabo sólo en las caras del piezoeléctrico, no en el lateral. Tanto en los monomorfos como en los bimorfos, las capas de material del disco piezoeléctrico se unen con un sustrato.

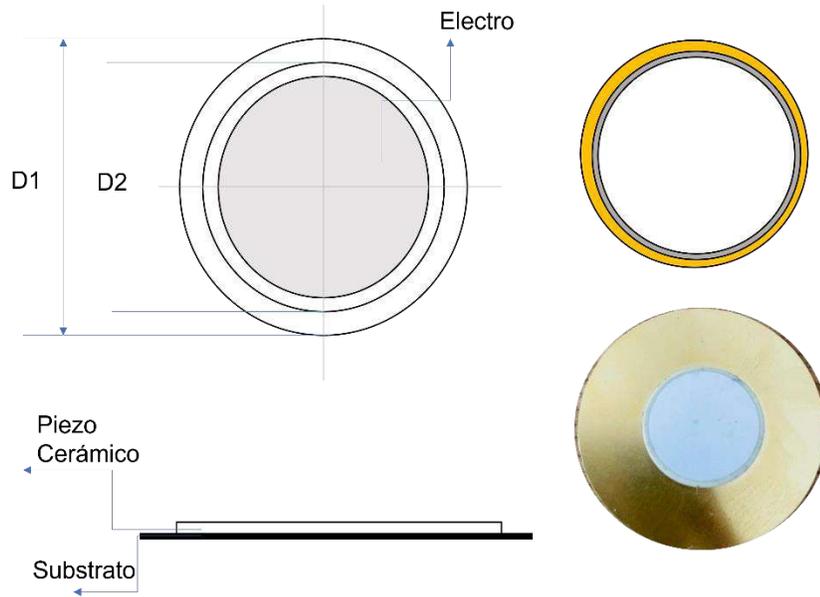


Figura 2.4 Estructura de un actuador piezoeléctrico Adaptado de (Pi, n.d.).

Para algunas aplicaciones especiales, los bimorfos no tienen un sustrato intercalado entre las dos capas del piezoeléctrico, sino que las dos piezas de los discos PZT están unidas directamente entre sí. El sustrato actúa como base y estabilizador para los actuadores de disco y puede ser de cualquier material, conductor o no conductor. Durante el proceso de deformación, un sustrato mantiene unido el producto piezoeléctrico y evita que se deshaga.

Es importante mencionar que se decidió utilizar este tipo de transductor debido a que es un producto de bajo costo y tiene la ventaja de estar a la venta con el material piezoeléctrico adherido a la capa estructural que además cuenta con las características para llevar a cabo el cosechador, conjuntamente sus propiedades geométricas son favorables para la recolección de energía, es decir, de acuerdo con sus dimensiones es posible recolectar más energía a diferencia de un tamaño micrométrico.

## 2.6 Materiales Piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se pueden clasificar como monocristal, piezocerámica, película delgada piezoeléctrica, composites y polímeros.



Las piezocerámicas se fabrican calentando los polvos de los materiales deseados a alta temperatura. En un proceso llamado sinterización. Son los policristalinos, es decir, una combinación de muchas orientaciones diferentes de cristales y dominios. No son piezoeléctricos a nivel macroscópico.

Los materiales cerámicos son frágiles por naturaleza. En un entorno que implica mucho esfuerzo mecánico como en un automóvil, un material más delgado y flexible como la película delgada, estas son capas delgadas de materiales piezoeléctricos depositados en un sustrato también se utilizan en impresoras de inyección de tinta y recolección de energía a microescala, otra alternativa sería el uso de materiales compuestos flexibles que consisten en partículas piezoeléctricas en el interior una matriz polimérica (Thiruvetselvam, 2019 n.d.).

Los materiales piezoeléctricos muestran anisotropía (J. Yang, 2006). Esto demuestra que las propiedades del material dependen de la dirección de deformación, la polarización y orientación de los átomos, así como de la posición de los electrodos. En esencia, hay muchos materiales piezoeléctricos, pero cuando se trata de materiales de ingeniería piezoeléctrica, deben seguir un proceso llamado polarización para que su comportamiento sea piezoeléctrico.

Las formas comúnmente disponibles de materiales piezoeléctrico son:

- Cristales: Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), (Figura 2.3); Berlinita ( $\text{AlPO}_4$ ), Ortofosfato de Galio ( $\text{GaPO}_4$ ), Turmalina.
- Cerámica policristalina: Titanato de Bario ( $\text{BaTiO}_3$ ), Titanato de Zirconato de Plomo (PZT).
- Materiales no ferroeléctricos de película delgada: Óxido de Zinc pulverizado ( $\text{ZnO}$ ), Nitrato de Aluminio ( $\text{AlN}$ )
- Materiales poliméricos: Fluoruro de Polivinilidina (PVDF)
- Películas gruesas imprimibles en pantalla basadas en polvos piezocerámicos y compuestos como polivinilideno-trifluoroetileno-PZT (PVDF-TrFE)



- Cristales orgánicos: Cloruro de Disopropilamonio Monocristalino (DIPAC) y Bromuro de Disopropilamonio (DIPAB)

Los materiales piezoeléctricos más comunes son los poliméricos, los piezo-compuestos y en esencia los cerámicos.

### 2.7 Conversión Piezoeléctrica

La conversión piezoeléctrica es un fenómeno en el cual se transforma la energía mecánica en energía eléctrica, y viceversa, a través de materiales piezoeléctricos. Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de generar una carga eléctrica en respuesta a una fuerza mecánica, como la presión o la vibración, y de generar una deformación mecánica en respuesta a una carga eléctrica. Este fenómeno se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde sensores de vibración hasta dispositivos de generación de energía. Por ejemplo, los encendedores piezoeléctricos utilizados en los encendedores de gas para estufas y parrillas convierten la energía mecánica de presionar un botón en una chispa eléctrica para encender el gas.

En la industria de la energía renovable, la conversión piezoeléctrica se utiliza en dispositivos de generación de energía que convierten la energía mecánica de las olas del mar o el viento en energía eléctrica. También se está investigando la posibilidad de utilizar materiales piezoeléctricos en pavimentos y carreteras para convertir la energía mecánica de los vehículos en energía eléctrica. En resumen, la conversión piezoeléctrica es un fenómeno interesante y útil que tiene una amplia variedad de aplicaciones en la tecnología moderna.

### 2.8 Transductores piezoeléctricos

Los transductores son dispositivos que convierten una forma de energía en otra, como la transferencia de entrada mecánica a salida eléctrica y viceversa. Los transductores piezoeléctricos son transductores que pueden convertir cualquier forma de presión o esfuerzo mecánico en energía eléctrica y también traducir esa señal eléctrica en movimiento físico. El término piezo o piezoeléctrico se refiere a la electricidad causada por la presión física. Los transductores piezoeléctricos, comúnmente conocidos como transductores PZT, pueden medir estas energías



físicas y convertirlas en una forma proporcional de energías o señales eléctricas. En el mismo sentido, esas señales eléctricas pueden utilizarse para generar más energía mecánica.

#### 2.8.1 Mecánica detallada de transductores piezoeléctricos

Un transductor piezoeléctrico se puede describir como una combinación de un sensor y un actuador piezoeléctricos, a veces llamado transmisor piezoeléctrico. Un sensor piezoeléctrico detecta cambios mecánicos en el mundo exterior y los traduce en una señal eléctrica que puede usarse para medir esos cambios. Un actuador piezoeléctrico puede convertir la señal eléctrica en energía mecánica o movimiento físico. Una vez ensamblado, un transductor piezoeléctrico se puede diseñar para realizar una o ambas funciones como sensor y actuador, dependiendo de cómo se construya el transductor.

Un sensor piezoeléctrico recibirá información sobre una fuerza mecánica y convertirá esa entrada física en una salida eléctrica proporcional. En algunas ocasiones se utilizan dos transductores piezoeléctricos, uno que actúa como sensor y otro que actúa como transductor, mientras que otros conjuntos solo utilizan un transductor piezoeléctrico para realizar ambas funciones. El transductor piezoeléctrico convierte los cambios mecánicos en una señal eléctrica y luego puede usar esa señal para generar desplazamiento.

Los movimientos suelen ser finos y pequeños; sin embargo, los transductores piezoeléctricos son extremadamente exactos y precisos. luego puede usar esa señal para generar desplazamiento.

#### 2.8.2 Ventajas y desventajas de los transductores piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos son extremadamente volátiles en el sentido de que no tienen restricciones en cuanto a la forma en que se fabrican. Esto les da a los transductores piezoeléctricos una gama significativamente más amplia de aplicaciones potenciales en comparación con otros tipos de transductores. Su capacidad de autogenerar voltaje también elimina la necesidad de una fuente de alimentación externa. Algunas aplicaciones aprovechan esta propiedad de los



transductores PZT y la utilizan para recolectar energía de los impactos mecánicos. Los transductores piezoeléctricos pueden operar efectivamente a voltajes muy bajos y temperaturas relativamente altas (hasta su punto de Curie), aumentando aún más su rango de aplicaciones.

A pesar de su volatilidad, los transductores piezoeléctricos tienen deficiencias, una de las cuales es la alta impedancia. Dado que su resistencia a la corriente es alta, los transductores piezoeléctricos a menudo generan voltajes o salidas muy bajos. Esto hace que estos dispositivos se vuelvan dependientes de los amplificadores, que en algunos casos pueden inducir un error eléctrico.

### 2.8.3 Aplicaciones

- Limpieza ultrasónica
- Recolección de energía
- Acelerómetros
- Medición y ajuste de nivel de líquido
- Medición y ajuste de flujo de gas y fluidos
- Generación de ultrasonido
- Asistente de carril automotriz, frenado automático, ayuda de estacionamiento
- Amplificación de sonido
- Respuesta de entrada táctil
- Puertas automáticas

### 2.8.4 Aplicaciones de transductores piezoeléctricos

Los transductores piezoeléctricos se utilizan ampliamente en las industrias industrial, aeroespacial, automotriz, comercial y médica para muchas aplicaciones. En entornos industriales, los transductores piezoeléctricos se pueden usar para medir y ajustar los cambios en la presión, la aceleración, el flujo y los niveles de líquido. Las funciones de asistencia de estacionamiento, asistencia de carril y frenado automático utilizan transductores piezoeléctricos para detectar el obstáculo y hacer ajustes físicos para evitarlo.



Comercialmente, los transductores también se pueden encontrar ampliamente en productos musicales, incluidos micrófonos, teclados, guitarras eléctricas, etc. Por ejemplo, la producción de sonido utiliza transductores piezoeléctricos para captar señales eléctricas de micrófonos y amplificar el sonido. Muchos productos de consumo cotidiano también utilizan transductores piezoeléctricos, como llaveros, microondas, relojes, alarmas y teclados PIN. Son la función detrás de las puertas correderas automáticas: una persona que activa el sensor (sensor) activará la apertura de la puerta (actuador).

Los transductores piezoeléctricos se encuentran en muchas aplicaciones automotrices, incluidos los inyectores de combustible y las funciones de frenado de seguridad. Los equipos dentales utilizan transductores piezoeléctricos ultrasónicos por su capacidad de limpieza precisa y potente.

La industria médica está evolucionando rápidamente todos los días con la ayuda de la piezoelectricidad. Los transductores piezoeléctricos se utilizan en muchas máquinas y equipos para dosificar medicamentos o incluso realizar cirugías. Por ejemplo, los transductores piezoeléctricos se pueden usar para detectar y romper cálculos renales. La piezoelectricidad es un recurso innegablemente beneficioso y las aplicaciones de los transductores piezoeléctricos son ilimitadas.

Los transductores piezoeléctricos también tienen una capacidad innata para vibrar a un ritmo muy rápido, lo que es útil en aplicaciones ultrasónicas, diversos productos de limpieza, así como herramientas médicas y quirúrgicas. La limpieza por ultrasonido que utiliza transductores piezoeléctricos funciona al vibrar rápidamente cuando se opera a las frecuencias ultrasónicas apropiadas. Con un transductor piezoeléctrico en el líquido de limpieza, la rápida expansión y contracción de las vibraciones ejerce suficiente fuerza para limpiar. Este método de usar la fuerza adicional de las vibraciones se ve comúnmente en odontólogos, joyeros y electricistas.



### 2.8.5 Recolección de energía

En ciertos casos en que las fuentes de energía cableadas o la energía de la batería son costosas o inviables, el transductor piezoeléctrico proporciona la solución perfecta. Pueden generar energía a partir de fuentes ambientales, una solución comúnmente utilizada es en sistemas de energía lumínica. Los transductores piezoeléctricos también se utilizan junto con sensores y máquinas de muy baja potencia (como relojes de pulsera), ya que pueden funcionar eficazmente con solo milivoltios de energía.

Las capacidades de energía ambiental de los transductores piezoeléctricos se utilizan mejor cuando las necesidades de energía son periódicas y cercanas a la frecuencia de resonancia del cosechador. Si la energía ambiental es constante, se produce el problema de la pérdida de electrones, lo que hace que el recolector pierda lentamente la producción de energía con el tiempo. Los transductores piezoeléctricos tienen un potencial ilimitado para mejorar la eficiencia de los productos de consumo diario.

Un ejemplo de una aplicación de recolección de energía se encuentra en las aplicaciones que generan energía al caminar. Al incorporar transductores piezoeléctricos en la suela del zapato, la presión aplicada al caminar se convierte en carga eléctrica que se puede usar para cargar pequeños electrodomésticos como teléfonos celulares viejos o relojes inteligentes. El mismo principio se destina a aplicaciones industriales más grandes, como los trenes. Los transductores piezoeléctricos integrados en las vías del tren pueden convertir la energía mecánica de la presión o aceleración del tren en una carga eléctrica para alimentar otros dispositivos. Otro excelente ejemplo de recolección de energía de transductores piezoeléctricos se puede ver en dispositivos de carga para Internet de las cosas o sensores físicos de Internet que intercambian datos con otros sensores. Estos sensores piezoeléctricos reciben señales ultrasónicas en el aire a través de vibraciones.



## 2.9 Formas de los distintos transductores comerciales

### 2.9.1 Transductores piezoeléctricos de disco

Los transductores piezoeléctricos en forma de disco son elementos piezoeléctricos circulares que se encuentran a menudo en funciones automotrices, producción, amplificación de sonido, medición de nivel de líquidos, fluidos y aplicaciones ultrasónicas. Como transductores piezoeléctricos, los discos se utilizan en aplicaciones automotrices, industriales, comerciales, ultrasónicas para detectar cambios y realizar ajustes.

### 2.9.2 Transductores piezoeléctricos de tira

Los transductores piezoeléctricos en forma de tira son piezas delgadas de material piezoeléctrico activo conectadas a una capa pasiva. Los transductores piezoeléctricos de flexión de tiras tienen una capa piezoeléctrica activa o dos capas piezoeléctricas activas que se doblan y contraen para crear deflexión. Los transductores piezoeléctricos de banda se utilizan comúnmente en el control de válvulas, bombas, acelerómetros, interruptores/controles táctiles y maquinaria fina.

### 2.9.3 Transductores piezoeléctricos de anillo

Los transductores piezoeléctricos en forma de anillo se utilizan para detectar cambios en la vibración o la presión y generar una salida eléctrica utilizable, se encuentran a menudo en aplicaciones ultrasónicas, médicas, equipos de limpieza dental y máquinas dosificadoras de medicamentos.

### 2.9.4 Transductores piezoeléctricos de tubo

Los transductores piezoeléctricos en forma de tubo también se conocen como cilindros piezoeléctricos, a menudo se utilizan para mediciones, ajustes de flujo y nivel, microscopía de barrido, microdosificación, se encuentran comúnmente en la industrias y comercios.



### 2.9.5 Transductores piezoeléctricos bimorfos

Los transductores piezoeléctricos bimorfos constan de dos capas piezoeléctricas activas, a menudo unidas a un sustrato metálico. Este sustrato actúa como una capa pasiva entre las dos capas activas de elementos piezoeléctricos, permitiendo que una capa piezoeléctrica se contraiga mientras que la otra capa piezoeléctrica se expande cuando se recibe una entrada mecánica o eléctrica. Esto provoca un movimiento de flexión que puede realizar una tarea deseada o generar una salida eléctrica legible.

### 2.9.6 Transductores piezoeléctricos Unimorph

Los transductores piezoeléctricos Unimorph consisten en una capa piezoeléctrica activa a menudo unida a un sustrato de metal pasivo. Los monomorfos se deforman en una sola dirección cuando son activados por una entrada eléctrica o mecánica y pueden producir una salida eléctrica o mecánica dependiendo de la entrada recibida.

### 2.9.7 Transductores piezoeléctricos de placa y bloque

Los transductores piezoeléctricos en forma de placa o bloque se utilizan comúnmente para medir y ajustar la vibración y la presión, se encuentran a menudo en aplicaciones ultrasónicas y acelerómetros en diversas industrias, como la aeroespacial, automotriz y médica.

### 2.10 Propiedades y aplicaciones de los materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos tienen varias propiedades únicas que los hacen valiosos en una amplia variedad de aplicaciones. Algunas de las propiedades y aplicaciones de los materiales piezoeléctricos incluyen:

- Generación de energía eléctrica: Los materiales piezoeléctricos pueden convertir la energía mecánica en energía eléctrica, lo que los hace útiles en la generación de energía a partir de vibraciones, movimientos o deformaciones mecánicas.
- Detección de vibraciones y fuerzas: Los materiales piezoeléctricos pueden



ser utilizados como sensores para detectar vibraciones y fuerzas en sistemas mecánicos. Por ejemplo, se utilizan en la industria aeroespacial para detectar la vibración en las alas de los aviones.

- Estabilización de frecuencia: Los materiales piezoeléctricos se utilizan en la fabricación de osciladores y resonadores que son críticos en la estabilización de frecuencia en aplicaciones como relojes de cuarzo y sistemas de telecomunicaciones.
- Aplicaciones médicas: Los materiales piezoeléctricos se utilizan en aplicaciones médicas, como la ecografía, donde se utilizan para producir ondas sonoras de alta frecuencia que penetran el tejido humano para producir imágenes.
- Actuación y control: Los materiales piezoeléctricos se utilizan en aplicaciones de actuación y control, como el control de vibraciones en edificios y estructuras.
- Tecnología de impresión: Los materiales piezoeléctricos se utilizan en la tecnología de impresión, como la impresión de inyección de tinta, donde se utilizan para expulsar pequeñas cantidades de tinta a través de los inyectores.

## 2.11 Cosechadores de energía

### 2.11.1 Cosecha de energía basado en la energía vibracional

Los cosechadores de energía son dispositivos que, en forma efectiva y eficiente, acumulan, almacenan, acondicionan y administran esta energía, suministrándola de tal forma que pueda ser utilizada para realizar una tarea útil.

Debido a que la energía se encuentra en pequeñas cantidades por todas partes, ya sea en forma de energía solar, en el viento, cuerpo humano, mecánica, entre otras fuentes, y no alcanza a ser utilizada al no proveer la potencia suficiente. El cosechamiento energético es el proceso por el cual la energía que hay en el ambiente es capturada y, si así se requiere, puede ser también almacenada para energizar pequeños dispositivos autónomos.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Dentro de estas tecnologías se incluyen la fotovoltaica, termo voltaica, piezoeléctrica y electrodinámica, entre otras opciones, las cuales son actualmente utilizadas en diversas aplicaciones.

La cosecha de energía (Energy Harvesting) es el proceso de captura de pequeñas cantidades de energía de una de esas fuentes naturales, acumulando y almacenando para su posterior uso. Los dispositivos de Energy-harvesting, capturan, acumulan y gestionan la energía para poderlos utilizar de una manera sencilla. Estos módulos pueden ser utilizados para suministrar potencia a sensores y dispositivos de control que trabajen de forma intermitente.

#### Aplicaciones de Cosecha de Energía:

Muchas aplicaciones basadas en la cosecha de energía son ya una realidad. Los sistemas inalámbricos de redes de sensores, tales como los sistemas de ZigBee a menudo se benefician de las fuentes de cosecha de energía. Por ejemplo, cuando un nodo inalámbrico está implementado en un sitio distante de un enchufe de pared o de una batería puede utilizarse la cosecha de energía como solución.

#### 2.12 Componentes de los materiales piezoeléctricos

##### Fuentes más comunes de cosechas de energía:

- Energía Mecánica: Basada en las vibraciones y en las tensiones mecánicas
- Energía Térmica: Útil en hornos, calentadores, neveras, etc.
- Energía Solar: Capturada de la luz solar o artificial a través de sensores a la luz, fotodiodos, o paneles solares
- Energía Electromagnética: Procedente de inductores, transformadores, etc.
- Energía Natural: Procedente del aire, corrientes de aguas, etc.
- Energía Humana: Una combinación de energía mecánica y térmica generada de forma natural a partir del ser humano a través de acciones tales como caminar y sentarse

- Otra Energía: Como energía química, biológica, etc.

### 2.13 Constante piezoeléctrica

Las direcciones se designan con 1, 2 y 3, que corresponden a los ejes X, Y y Z de los conjuntos de ejes ortogonales de la derecha. Los ejes de rotación se designan con 4, 5 y 6. La dirección de polarización (eje 3) se establece durante el proceso de pulido por un fuerte campo eléctrico aplicado entre los dos electrodos. Dado que el material piezoeléctrico es anisotrópico, las cantidades físicas se describen mediante tensores (Figura 2.5). Por lo tanto, los coeficientes piezoeléctricos están indexados en consecuencia.

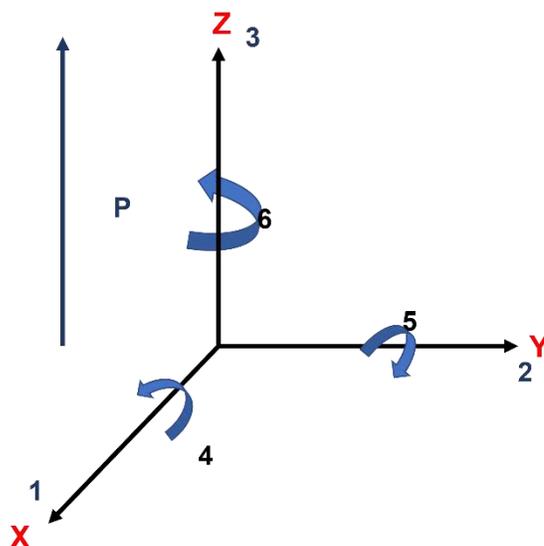


Figura 2.5 Sistema de coordenadas Ortogonal para describir las propiedades de una cerámico piezoeléctrico. El vector de polarizaciones paralelo al eje 3 (Z), adaptado de (Al-Yafeai et al., 2020).

Los recolectores de energía piezoeléctricos en voladizo pueden funcionar en dos modos: modo  $d_{33}$  y el modo  $d_{31}$  (Zhu, n.d.). En el modo  $d_{31}$ , se aplica una fuerza lateral en la dirección perpendicular a la dirección de polarización. En este caso, la flexión haz tiene electrodos en sus superficies superior e inferior. En el modo  $d_{33}$ , las fuerzas se aplican en la misma dirección que la dirección de polarización, donde la viga de flexión tiene todos los electrodos en su superficie superior. A pesar de que los materiales piezoeléctricos que funcionan en el modo  $d_{31}$  normalmente tienen coeficientes de acoplamiento más bajos que en el modo  $d_{33}$ , el modo  $d_{31}$  se usa más comúnmente. Esto se debe a que cuando un voladizo de una sola capa o

una viga de doble sujeción se dobla, se requiere más esfuerzo lateral producido que el esfuerzo vertical, lo que facilita el acoplamiento en modo  $d_{31}$ . Se puede aplicar un principio similar a las cosechadoras con otras estructuras.

Los materiales piezoeléctricos tienen una polarización incorporada por ello responden de manera diferente a las tensiones aplicadas dependiendo de su dirección. Hay dos tipos de modos primarios de acoplamiento electromecánico para los materiales piezoeléctricos:

- Modo 31.- donde el campo eléctrico se produce sobre un eje ortogonal al eje de deformación (Figura 2.6 (a)).
- Modo 33.- el campo eléctrico producido se sitúa en el mismo eje que la deformación aplicada (Figura 2.6 (b)).

Son los coeficientes piezoeléctricos más significativos utilizados en PEH.

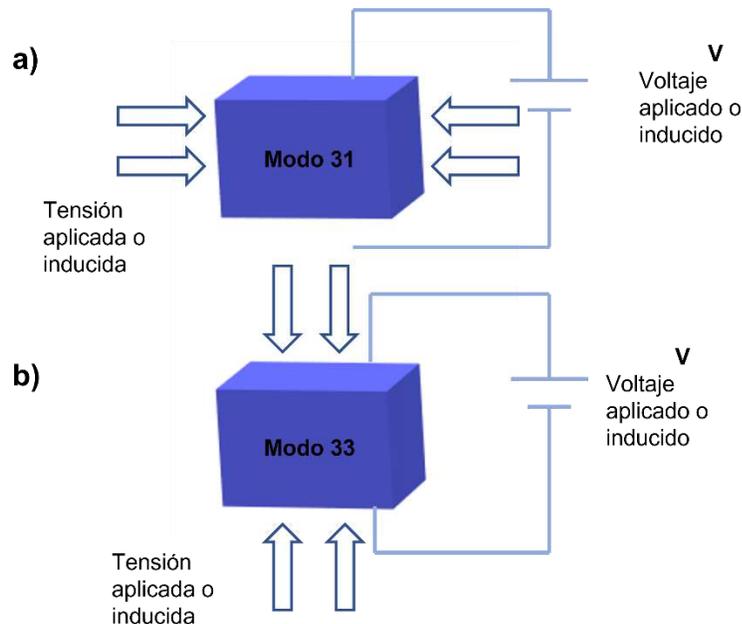


Figura 2.6 a) modo 31 (longitudinal), b) modo 33 (transversal), adaptado de (Al-Yafeai et al., 2020).

El modo longitudinal (presentado en la Figura 2.6 a)) se estudió ampliamente utilizando transductores de platillo, unimorfos y bimorfos. En este modo, se fijan capas delgadas piezoeléctricas sobre una estructura de soporte y se colocan entre



las capas de electrodos. Cuando se aplica un campo eléctrico en dirección vertical, se produce una tensión/deformación en dirección horizontal.

Un ejemplo de un transductor piezoeléctrico que funciona en modo  $d_{33}$  es el transductor tipo pila. El modo de funcionamiento se basa en el hecho de que el transductor tiene varias capas delgadas piezoeléctricas conectadas en paralelo y la conexión mecánica es en serie, superpuestas unas sobre otras. Debido a las capas delgadas conectadas mecánicamente en serie, el desplazamiento total del transductor de pila piezoeléctrico es el producto entre el número total de las capas y el movimiento de cada capa.

## 2.14 Modelado matemático

### 2.14.1 Ecuaciones constitutivas fundamentales y coeficientes piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos polarizados se caracterizan por varios coeficientes y relaciones. Las relaciones básicas entre las propiedades eléctricas y elásticas, así como el efecto piezoeléctrico directo e indirecto se pueden representar de la siguiente manera mediante un par de ecuaciones constitutivas lineales como las siguientes:

$$S = [s^E] T + [d]^t E \tag{1}$$

$$D = [d]T + [\epsilon^T] E \tag{2}$$

Donde:

$S$ : Vector de deformación.

$D$ : Vector de desplazamiento eléctrico.

$[s^E]$ : Matriz de flexibilidad, para campo eléctrico aplicado,  $E$ , constante.

$\{T\}$ : Vector de esfuerzo aplicado

$[d]$ : Matriz de coeficientes piezoeléctricos

$[\epsilon^T]$ : Matriz de permitividad dieléctrica (para un esfuerzo mecánico aplicado,  $T$ , constante)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

$E$ : Vector de campo eléctrico aplicado

$t$ : indica matriz transpuesta.

Estas relaciones sólo se aplican a pequeñas amplitudes eléctricas y mecánicas, esto es, a magnitudes de señal pequeñas. Dentro de este rango, las relaciones entre las componentes de deformación elástica  $S$  o el esfuerzo  $T$  y los componentes del campo eléctrico ( $E$ ) son lineales (Pi, n.d.).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



# CAPITULO 3.

# METODOLOGÍA



### 3. CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

#### Etapa 1

- Comprensión de los conceptos de efecto piezoeléctrico, cosechamiento de energía y estructuras bicapa.
- Revisión de estructuras bicapa en ANSYS Workbench
- Análisis del estado del arte

#### Etapa 2

- Revisión de materiales piezoeléctricos
- Caracterización y adquisición de materiales
- Análisis de modelado matemático
- Revisión de posibles aplicaciones
- Caracterización del modelo cosechador preliminar

#### Etapa 3

- Caracterización del modelo cosechador optimizado
- Implementación de materiales seleccionados por disponibilidad y sustentabilidad
- Ajustes y optimización de dimensiones
- Propuesta de arreglo cosechador de energía
- Discusión de resultados

#### Etapa 4

- Redacción de tesis
- Propuesta de trabajo futuro
- Redacción de un artículo/memoria en congreso

### 3.1 Metodología de diseño para transductor piezoeléctrico

El proceso de diseño para diferentes geometrías propuestas para las pruebas preliminares se muestra en la Figura 3.1, donde es importante mencionar que, tomando en cuenta la literatura, se menciona que variar la geometría de los cosechadores de energía ayudaría a mejorar la respuesta de operación, por tanto se propone un proceso de diferentes cortes, esto con el objetivo de mejorar la respuesta en las pruebas, cabe señalar que, la geometría inicial es el transductor piezoeléctrico de disco, y que los cortes se realizan tomando en cuenta no cortar el material piezoeléctrico

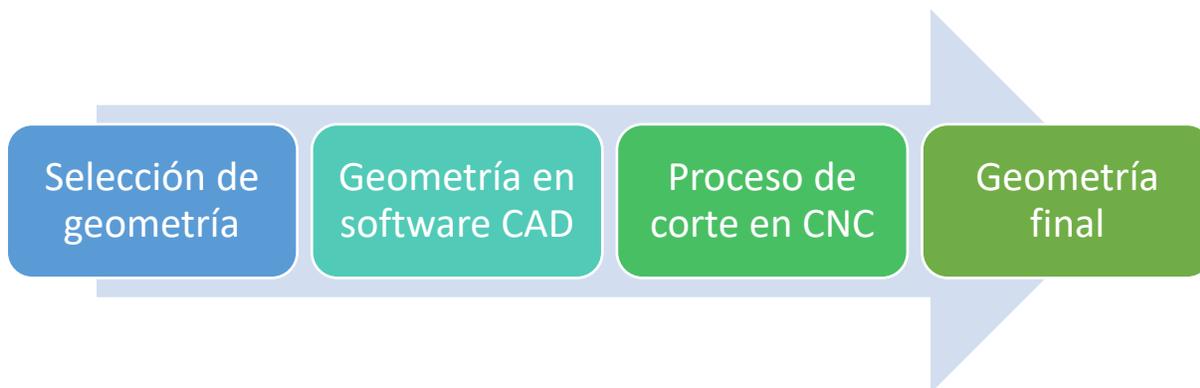


Figura 3.1 Proceso de modificación de geometría.

### 3.2 Metodología de diseño para un generador piezoeléctrico

En la figura 3.2 se presenta el proceso de diseño para un generador piezoeléctrico, utilizando transductores piezoeléctricos como material estructural.

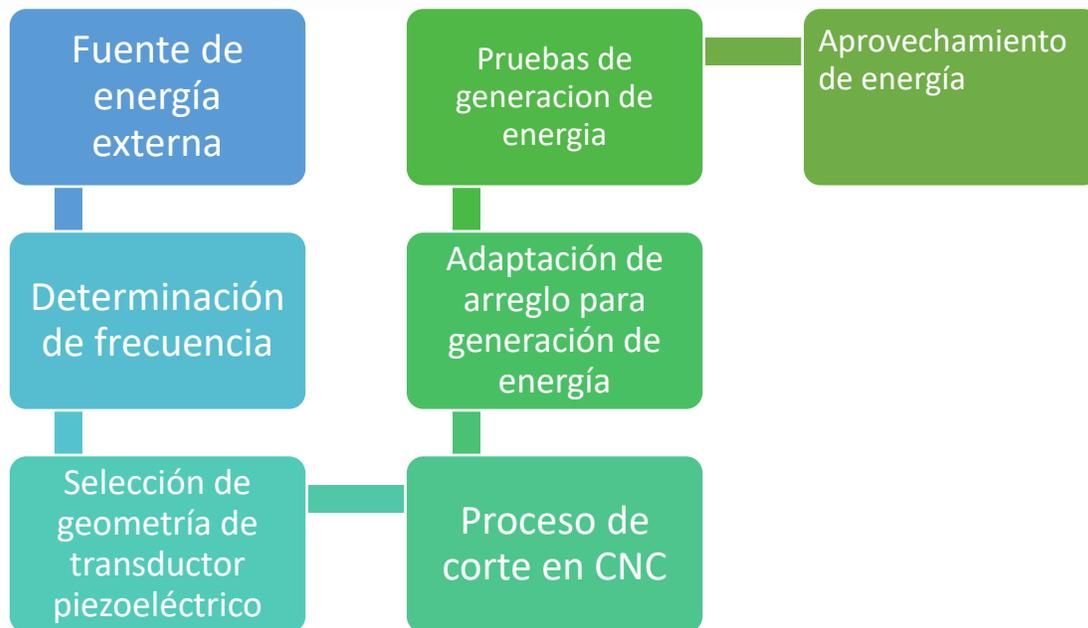


Figura 3.2 Proceso de diseño para un generador piezoeléctrico.

Es importante mencionar que la fuente de energía externa es de suma importancia debido a que, esta investigación se basa en energía vibracional y se debe determinar la frecuencia a la que se estará trabajando.

La determinación de la frecuencia como se mencionó anteriormente es importante debido a que a partir de este dato se va a configurar el arreglo correspondiente.

El proceso de corte en CNC, se lleva a cabo debido a que los transductores piezoeléctricos requieren cortes finos y precisos para evitar doblamientos no deseados que ocasionen perturbaciones en los resultados, en la Figura 3.3 se muestra el proceso de corte en una máquina de Control Numérico Computarizado (CNC).

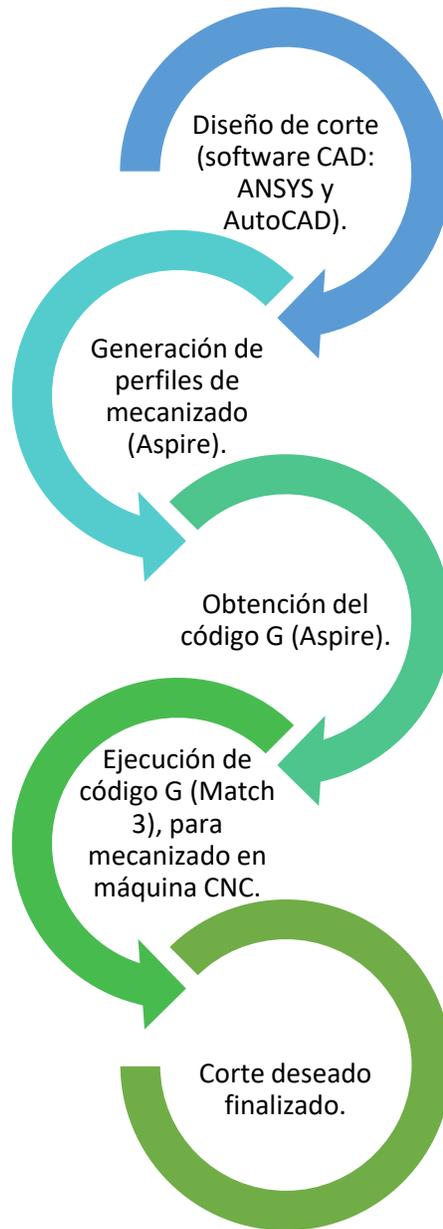


Figura 3.3 Proceso de corte en una máquina de Control Numérico Computarizado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



# CAPITULO 4. MODELADO, DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE TRANSDUCTORES PIEZOELECTRICOS PARA COSECHAMIENTO DE ENERGÍA

## 4. CAPITULO 4. MODELADO, DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE TRANSDUCTORES PIEZOELECTRICOS PARA COSECHAMIENTO DE ENERGÍA.

### 4.1 Modificación de material utilizado

Los discos piezoelectricos se utilizan ampliamente como actuadores, sensores y transductores en muchas industrias para un sinfín de aplicaciones. Los discos bimorfos piezoelectricos magnifican en gran medida la potencia y el rango de un actuador piezoelectrico, mientras usan muy poca corriente eléctrica. Debido a su construcción pequeña, delgada y liviana, los discos piezoelectricos son extremadamente eficientes y consumen muy poca energía. Los discos piezoelectricos tienen la capacidad de funcionar en temperaturas y entornos extremos, al mismo tiempo que ofrecen una respuesta transitoria y de alta frecuencia (Circular Piezo Ceramic Actuators (Unimorph and Bimorph Actuator), n.d.)

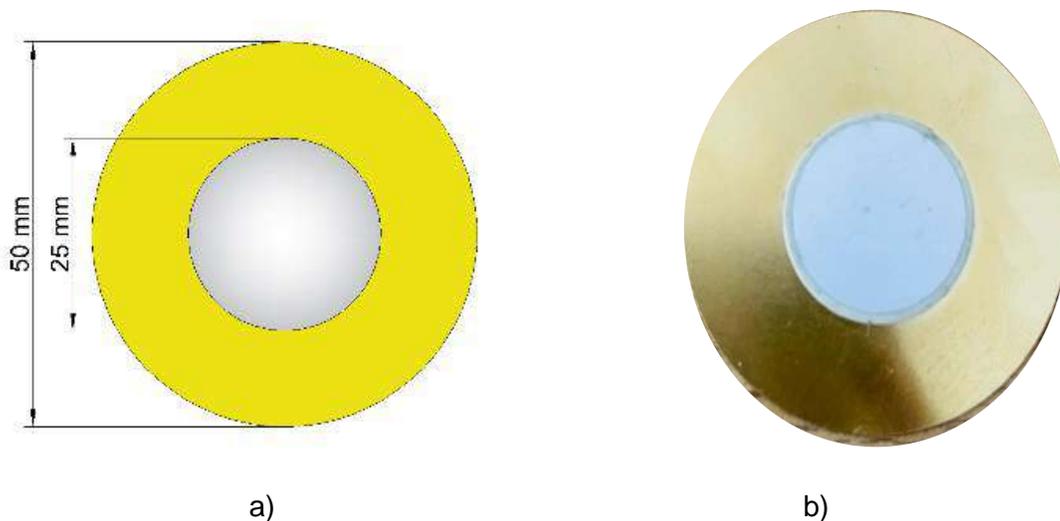


Figura 4.1 Transductor piezoelectrico. a) Representación esquemática de los diámetros. b) Transductor comercial.

El dispositivo utilizado para las pruebas preliminares fue un transductor piezoelectrico, conformado por un disco de latón (Brass) y un disco de PZT (Zirconato Titanato de Plomo), donde sus características de funcionamiento y elementos geométricos se muestran en la Tabla 4.1.



Tabla 4.1 Parámetros geométricos y eléctricos del transductor piezoeléctrico.

Elementos y características del piezocerámico		
Frecuencia de resonancia	3.2+0.3	Hz
Impedancia resonante	<200	$\Omega$
Material de la placa	Latón	-----
D (Latón)	50	mm
d (PZT)	25	mm
t1 (Latón)	0.18	mm
t2 (PZT)	0.45	mm
Voltaje de entrada permitido	1.5-30	V
Temperatura de operación	-20-70	$^{\circ}\text{C}$

Los cortes correspondientes fueron realizados en una máquina de cortes CNC (Computerized Numerical Control por sus siglas en inglés) como se observa en la Figura 4.2, esto con el objetivo de realizar cortes finos sin afectaciones al material que pueda reducir la eficiencia.

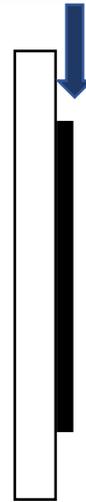


Figura 4.2 Proceso de cortes en CNC.

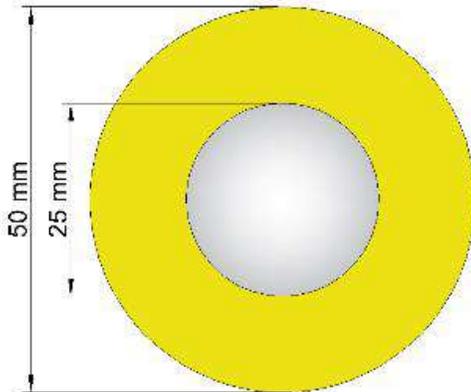
Parte de caracterización de los discos piezoeléctricos fue el cálculo de área, volumen y peso de cada compuesto para transductor piezoeléctrico circular, rectangular y trapezoidal, con el objetivo de obtener el gramaje de cada elemento de los materiales que componen a los transductores piezoeléctricos, en la Figura 4.3 se muestra los dispositivos esquemáticos de cada corte.



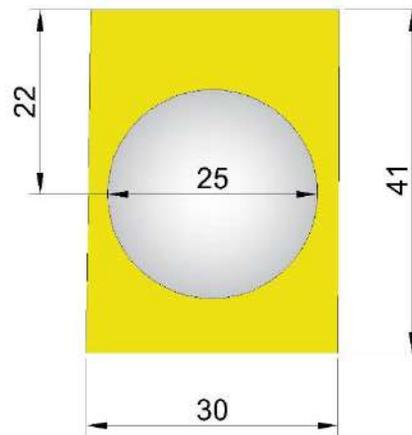
a)



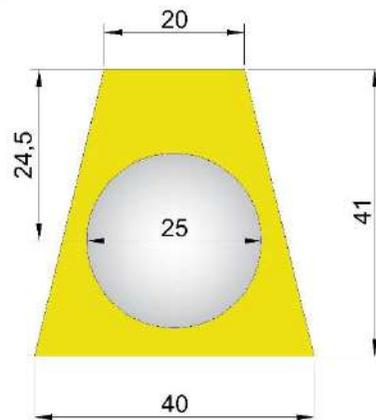
b)



c)



d)



e)

Figura 4.3 Transductores piezoeléctricos. a) Vista esquemática transversal, b) vista frontal, c) forma circular, d) forma rectangular y e) forma trapezoidal.

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de la masa de cada dispositivo, después de realizarse los cortes correspondientes.

Tabla 4.2 Calculo de masa de los elementos que conforman al transductor piezoeléctrico para las distintas geometrías.

Geometría		Área (cm <sup>2</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/ cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Fórmula molecular	Peso total Analítico (g)	Peso total experimental (g)	Error porcentual %
Circular	BRASS/LATON	0.625/ $\pi$	0.305	8.7	3	Cu <sub>3</sub> Zn <sub>2</sub> Cu: 1.8 g Zn: 1.2 g	3.77	3.92	3.4
	PZT	0.625/ $4\pi$	0.103	7.5	0.77	O <sub>3</sub> (PbZrTi) 0.4046 g de Pb 0.1781 g de Zr 0.0934 g de Ti 0.0937 g de O <sub>3</sub>			
Rectangular	BRASS/LATON	1.113 9	0.205	8.7	1.7	Cu: 1.2 g Zn: 0.68 g	2.74	2.6	3.7
	PZT	0.625/ $4\pi$	0.103	7.5	0.77	O <sub>3</sub> (PbZrTi) 0.4046 g de Pb 0.1781 g de Zr			



						0.0934 g de Ti 0.0937 g de O <sub>3</sub>			
	BRASS/LATON	1.38	0.248	8.7	1.8	Cu:1.08 g Zn: 0.72 g			
Trapezoidal	PZT	0.625/ 4pi	0.103	7.5	0.77	O <sub>3</sub> (PbZrTi) 0.4046 g de Pb 0.1781 g de Zr 0.0934 g de Ti 0.0937 g de O <sub>3</sub>	2.1	2.3	6.1

#### 4.2 Configuración preliminar de un sistema de cosechador de energía

Para los análisis preliminares se montó una estación de pruebas esto con el objetivo de caracterizar mecánicamente al transductor piezoeléctrico y analizar su comportamiento ante una frecuencia aplicada variada, obtener su frecuencia de resonancia, voltajes pico-pico, voltajes rectificadas, potencia y corriente.

En la Figura 4.4 se muestra la estación de pruebas conformada por:

1. Generador de frecuencias variada
2. Fuente externa de vibración
3. Base adaptada para sujeción de transductor piezoeléctrico
4. Circuito rectificador
5. Osciloscopio
6. LED

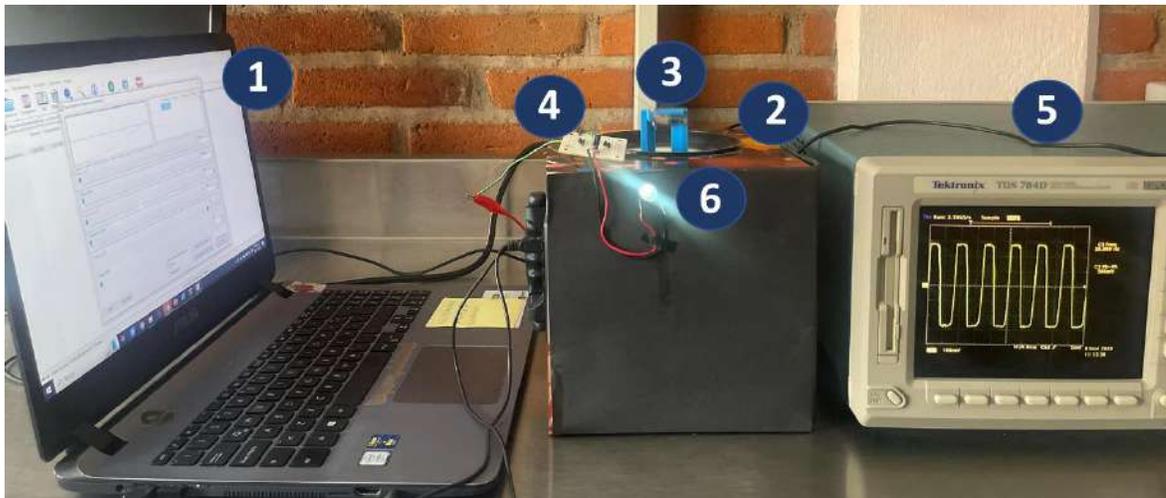


Figura 4.4 Estación de pruebas para cosechamiento de energía.

1. Generador de frecuencias variada: Se utilizó un generador de frecuencias para computadora lo que posibilita variar la frecuencia y volumen (Figura 4.5).

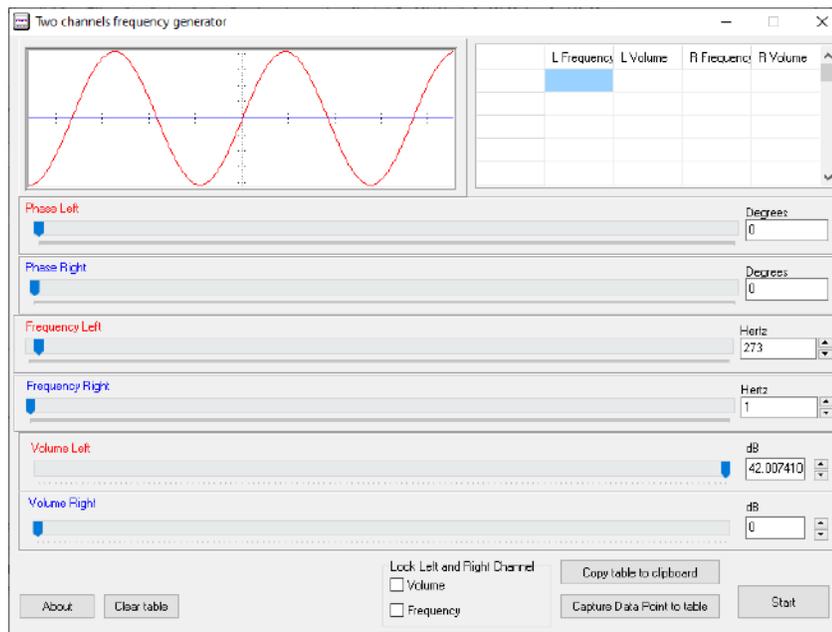
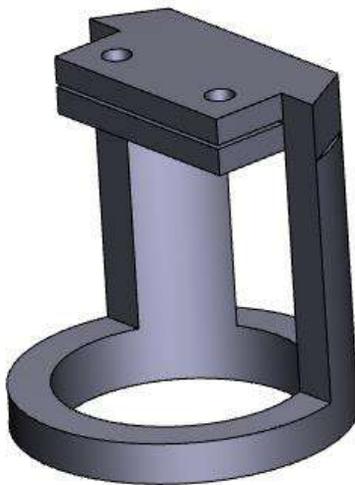


Figura 4.5 Frequency Generator (software de licencia libre)

2. Fuente externa de vibración: En la estación de pruebas se adaptó una bocina comercial para someter a los dispositivos a una frecuencia variada mediante el generador de frecuencias, esto con el objetivo de obtener su frecuencia de resonancia.

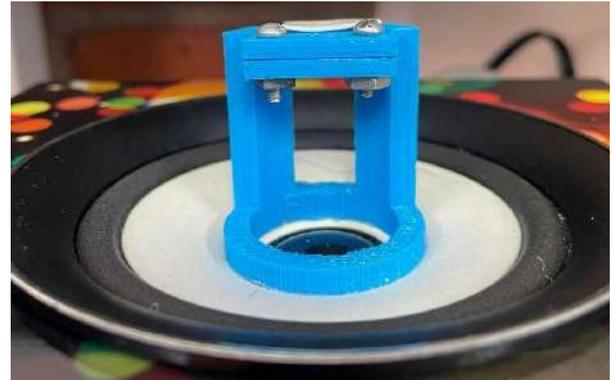
3. Base adaptada para sujeción de transductor piezoeléctrico: para poder someter al transductor piezoeléctrico en efecto voladizo con sus diferentes geometrías, fue esencial dibujar en Solidworks versión estudiantil y posteriormente imprimir en 3D una base que pudiera sujetarlo y este pudiera percibir las frecuencias inducidas de la bocina (Figura 4.6). Es importante mencionar que en la literatura no reportan estructuras en PLA, sin embargo, han sido reportadas estructuras en materiales como acrílico (Li et al., 2014), o aluminio, se decidió utilizar PLA por su bajo costo y por ser un material biodegradable, a diferencia de otros materiales que son más costosos y contaminantes.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6 Base para sujeción de transductor piezoeléctrico a) Estructura en Solidworks, b) vista desde arriba, c) vista frontal.

4. Circuito rectificador: el circuito rectificador es un sistema que adapta y convierte la energía (rectificador, convertidor, procesador).

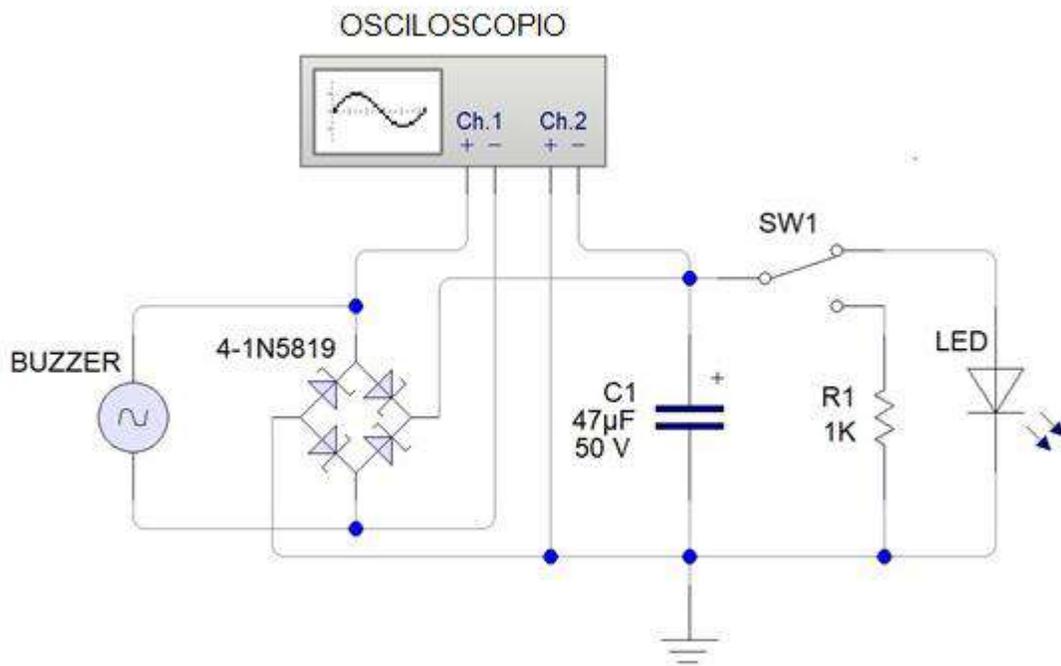


Figura 4.7 Circuito rectificador (Elaboración propia).



Como la corriente generada puede ser continua o alterna, se tiene los sistemas rectificadores de AC/DC y los convertidores DC/DC. La gran mayoría de las aplicaciones finales de pequeña potencia necesitan un suministro de corriente continua. Por lo que si se genera una corriente alterna, se necesita un convertidor de este tipo, que puede ser de media onda o de onda completa, siendo este último el que mejor aprovecha la potencia. El rectificador consiste en un circuito rectificador de onda completa encargado de conseguir que la señal eléctrica proporcionada por el elemento piezoeléctrico solo tenga valores positivos. Está basado en un puente de 4 diodos rectificadores 1N5819, una resistencia de 1 K $\Omega$ , un capacitor de 47  $\mu$ F 35 V, y un LED (Figura 4.7).

5. Osciloscopio: el osciloscopio fue clave para determinar el voltaje pico-pico en función de la frecuencia aplicada.

#### 4.3 Posibles aplicaciones y fuentes externas

Hoy en día, las baterías representan la fuente de energía dominante para los dispositivos de la Tabla 4.3 y similares. Algunas soluciones alternativas a las baterías son objeto de amplias investigaciones en todo el mundo, como es, cosechar energía del entorno utilizando, por ejemplo, energía de vibración/movimiento, energía térmica, luz o radiación de radiofrecuencia (Kamarudin et al., 2007).

*Tabla 4.3 Dispositivos que requieren bajo consumo.*



Tipo de dispositivo	Consumo de energía
Reproductor mp3	50 mW
Audífono	1 mW
Nodo sensor inalámbrico	100 $\mu$ W
Caminador cardiaco	50 $\mu$ W
Reloj de cuarzo	5 $\mu$ W

Algunas aplicaciones, en donde se podría utilizar la energía recolectada es en dispositivos de bajo consumo algunos ejemplos se muestran en la Tabla 4.3, esta tabla resume la potencia de salida que podría obtenerse de las fuentes ambientales cuando se utilizan dispositivos optimizados construidos con la tecnología de transductores disponible actualmente. Para cada tipo de fuentes se consideran diferentes situaciones ambientales, que corresponden a varios niveles de potencia disponible y, por lo tanto, de potencia eléctrica generada. Se observa que, la luz exterior supera a las demás fuentes de energía, pero la luz interior es altamente comparable con la energía térmica y a la vibración.

Es posible observar también que, mientras los entornos industriales parecen tener energía de sobra, alrededor del cuerpo la energía es mucho más limitada.

La Tabla 4.4 sugiere que los captadores de energía pueden utilizarse eficazmente en el rango de 10  $\mu$ W a 1mW, que es el típico de los nodos sensores inalámbricos. Un nodo sensor es un dispositivo compuesto por (i) un sensor que captura los parámetros físicos o químicos requeridos, (ii) de un módulo ADC y procesador de señales que se utilizará para transformar las mediciones en información útil (digital), y (iii) de un módulo de radio que permitirá la comunicación con dispositivos portátiles externos

El consumo de energía de un nodo sensor ha sido estimado por varios autores, trabajos recientes (Cook et al., 2006; Mitcheson et al., 2008) citan valores entre 1 y 20  $\mu$ W. El consumo depende en gran medida de la complejidad de la



cantidad detectada y del número de veces por segundo que haya que transmitir. La implementación práctica de un nodo sensor de sensores muestra que 90  $\mu\text{W}$  son suficientes para alimentar un sensor de pulso, para procesar los datos y transmitirlos a intervalos de 15 s (Torfs et al., 2006). Por tanto, el valor de 100  $\mu\text{W}$  indicado en la Tabla 4.4 es representativo de nodos relativamente complejos, para sistemas que operan con una tasa de datos relativamente alta.

La combinación de un recolector de energía con una batería recargable de pequeño tamaño (o con otro sistema de almacenamiento de energía, como una batería recargable de película fina o un supercondensador) es el mejor enfoque para permitir la autonomía energética de la red durante toda su vida útil.

Tabla 4.4 Características de las distintas fuentes de energía disponibles en el entorno y potencia cosechada (Vullers et al., 2009).

Fuente	Fuente de energía	Potencia
<b>Luz ambiental</b>		
Interior	0.1 mW/ cm <sup>2</sup>	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Exterior	100 mW/ cm <sup>2</sup>	10 mW/ cm <sup>2</sup>
<b>Vibración/movimiento</b>		
Humano	0.5 m @ 1 Hz 1 m/s <sup>2</sup> @ 50Hz	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industrial	1m @ 5 Hz 10m/s <sup>2</sup> @ 1kHz	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
<b>Energía térmica</b>		
Humano	20 mW/ cm <sup>2</sup>	30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industrial	100 mW/ cm <sup>2</sup>	1–10 mW/ cm <sup>2</sup>
<b>RF</b>		



Teléfono celular	0.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
------------------	-------------------------------	-------------------------------

#### 4.4 Cosecha de energía basado en la energía de las vibraciones

Cualquier movimiento de vibración, desde el que produce un motor hasta el movimiento de una persona al caminar, puede ser aprovechado para generar energía eléctrica. Para la captura de este tipo de energía se pueden utilizar sistemas electromagnéticos, electrostáticos y piezoeléctricos.

El fundamento de los sistemas piezoeléctricos se basa en la piezoelectricidad. Es decir, un cristal sometido a presión mecánica a lo largo de un eje desarrolla una diferencia de potencial entre sus caras. Algún ejemplo de esta tecnología es su implantación de sistemas en los zapatos, llegando a conseguir hasta 67 W de potencia en una persona de 68 kg.

#### 4.5 Resultados preliminares obtenidos mediante frecuencia moderada

En la Tabla 4.5 se muestran los principales resultados obtenidos implementando un barrido de frecuencias en un rango de 25-85 Hz, donde se resalta la frecuencia de resonancia que es aquella frecuencia característica de un cuerpo o un sistema que alcanza el grado máximo de oscilación. Posteriormente se muestran la Tabla 4.6, 4.7 y 4.8 correspondientes a los resultados completos obtenidos del barrido de frecuencias para cada parámetro. Con respecto a los resultados obtenidos de las Tablas anteriormente mencionadas, es importante señalar que, el barrido de frecuencia se limitó a 85 Hz, esto debido que, en la ficha de datos de operación del transductor piezoeléctrico, menciona que es recomendable no someter a los dispositivos a frecuencias mayores de 75 Hz, es importante mencionar que, una vez pasado 85 Hz el transductor piezoeléctrico comienza a minimizar su eficiencia.

*Tabla 4.5 Resultados obtenidos para diferentes geometrías.*



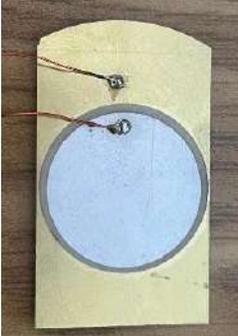
Geometría	Frecuencia de resonancia (Hz)	Voltaje pico-pico (V)	Voltaje de salida rectificad o (V)	Voltaje de salida rectificado con carga (982 $\Omega$ ) (V)	Potencia (mW)	Corriente (mA)
	55	46.4	22.7	0.282	0.0809	0.2871
	55	49.6	22.34	0.299	0.0910	0.3044
	65	46.8	22.45	0.373	0.1416	0.3798

Tabla 4.6 Resultados obtenidos para transductor circular.



GEOMETRIA	FRECUENCIA (HZ)	VOLTAJE PICO- PICO AC (V)	VOLTAJE SALIDA RECTIFICADO (V)	DE	VOLTAJE SALIDA RECTIFICADO (V) CON CARGA DE 1 KΩ	POTENCIA (MW)	CORRIENTE (MA)
<b>Circular</b>	25	4.32	3.6		0.01	0.000101833	0.010183299
	30	8.4	6.23		0.022	0.000492872	0.022403259
	35	14.4	9.7		0.049	0.00244501	0.049898167
	40	22.6	12.45		0.092	0.008619145	0.093686354
	45	28.8	15.36		0.133	0.018013238	0.135437882
	50	34.8	21.57		0.184	0.034476578	0.187372709
	55	46.4	22.7		0.282	0.08098167	0.287169043
	60	44	20.7		0.272	0.075340122	0.276985743
	65	21.4	9.71		0.137	0.019113035	0.139511202
	70	11.8	5.36		0.076	0.005881874	0.077393075
	75	9	3.97		0.051	0.002648676	0.051934827
	80	5.4	2.27		0.042	0.001796334	0.042769857
	85	4.2	1.52		0.025	0.000636456	0.025458248

Tabla 4.7 Resultados obtenidos para transductor con corte sin orillas.

GEOMETRIA	FRECUENCIA (Hz)	VOLTAJE PICO- PICO AC (V)	VOLTAJE SALIDA RECTIFICADO (V)	DE	VOLTAJE SALIDA RECTIFICADO (V) CON CARGA DE 1 KΩ	POTENCIA (mW)	CORRIENTE (mA)
<b>Circular sin orillas</b>	24	4.12	1.154		0.008	6.51731E-05	0.00814664
	30	6.8	2.305		0.013	0.000172098	0.013238289
	35	13.76	4.553		0.032	0.00104277	0.032586558
	40	19.4	8.62		0.073	0.00542668	0.074338086



45	26.8	11.7	0.119	0.01442057	0.121181263
50	36.8	15.08	0.176	0.031543788	0.179226069
55	49.6	22.34	0.299	0.091039715	0.304480652
60	36.8	15.6	0.208	0.044057026	0.211812627
65	17.6	7.22	0.1	0.010183299	0.101832994
70	10.8	4.1	0.057	0.003308554	0.058044807
75	7.6	2.5	0.037	0.001394094	0.037678208
80	5.6	1.905	0.029	0.000856415	0.029531568
85	4.4	1.76	0.046	0.002154786	0.046843177

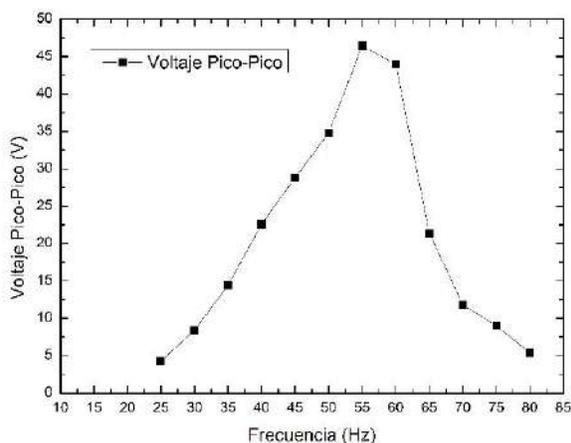
Tabla 4.8 Resultados obtenidos para transductor con corte de viga en voladizo.

GEOMETRIA	FRECUENCIA (Hz)	VOLTAJE PICO- PICO AC (V)	VOLTAJE DE SALIDA RECTIFICADO (V)	VOLTAJE DE SALIDA RECTIFICADO (V) CON CARGA DE 1 KΩ	POTENCIA (mW)	CORRIENTE (mA)
<b>Viga en voladizo</b>	25	2.64	0.87	0.006	3.66599E-05	0.00610998
	30	3.49	1.335	0.009	8.24847E-05	0.009164969
	35	6.04	2.586	0.018	0.000329939	0.018329939
	40	7.76	3.49	0.03	0.000916497	0.030549898
	45	10.4	4.848	0.049	0.00244501	0.049898167
	50	13.44	6.32	0.073	0.00542668	0.074338086
	55	16.24	7.47	0.101	0.010387984	0.102851324
	60	26.8	11.93	0.18	0.03299389	0.183299389

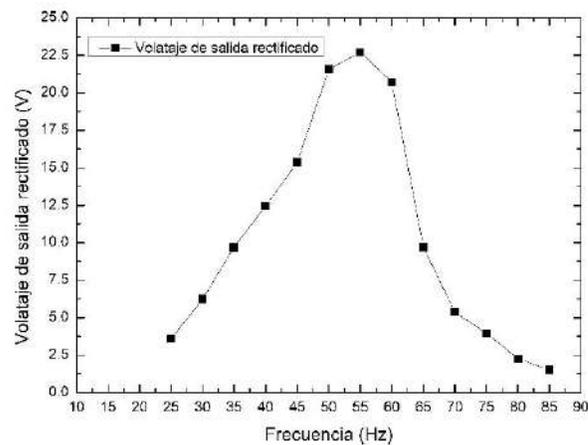


65	46.8	22.45	0.373	0.141679226	0.379837067
70	31.2	12.9	0.276	0.077572301	0.281059063
75	13.2	5.3075	0.089	0.008066191	0.090631365
80	7.92	3.22	0.051	0.002648676	0.051934827
85	4.32	1.717	0.03	0.000916497	0.030549898

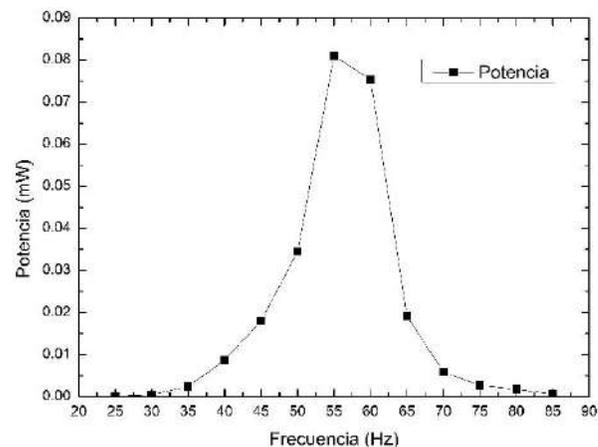
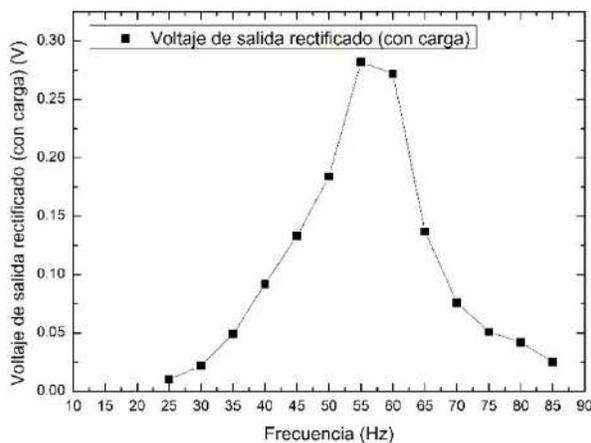
La frecuencia es una de las principales características de los PEHs por encima de otros parámetros, ya que la máxima potencia se genera en su frecuencia de resonancia. La conversión más eficaz de energía vibratoria a eléctrica se produce cuando existe una estrecha semejanza entre la frecuencia vibratoria aplicada y la frecuencia natural que posee el dispositivo.



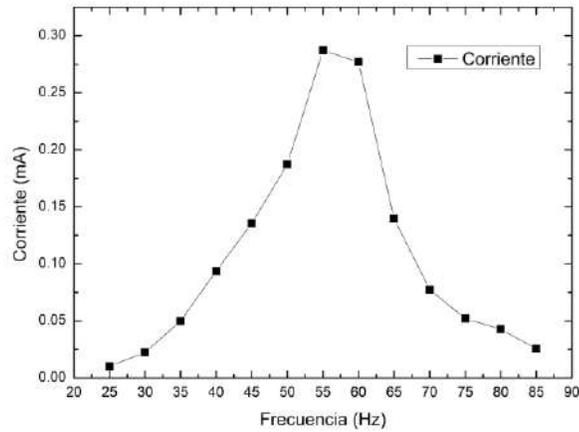
a)



b)



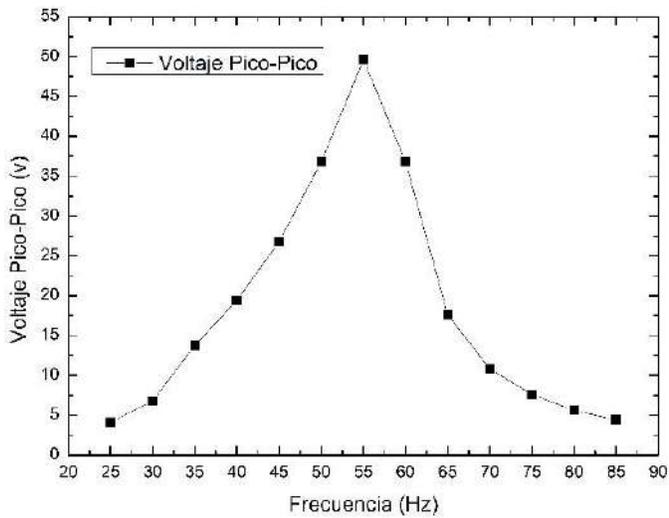
c)



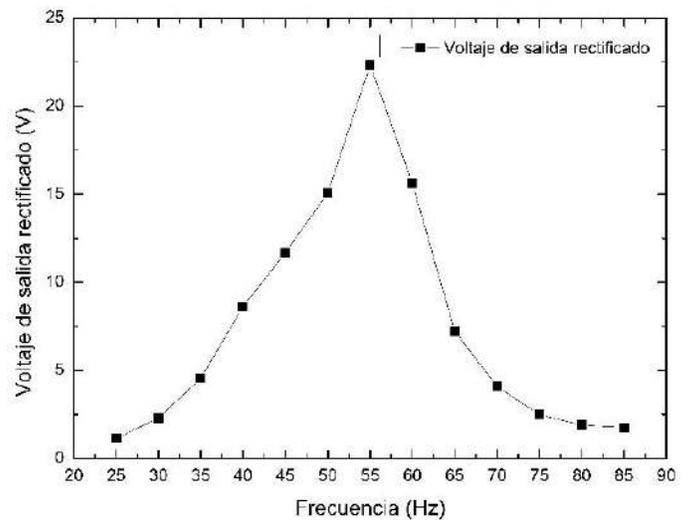
d)

e)

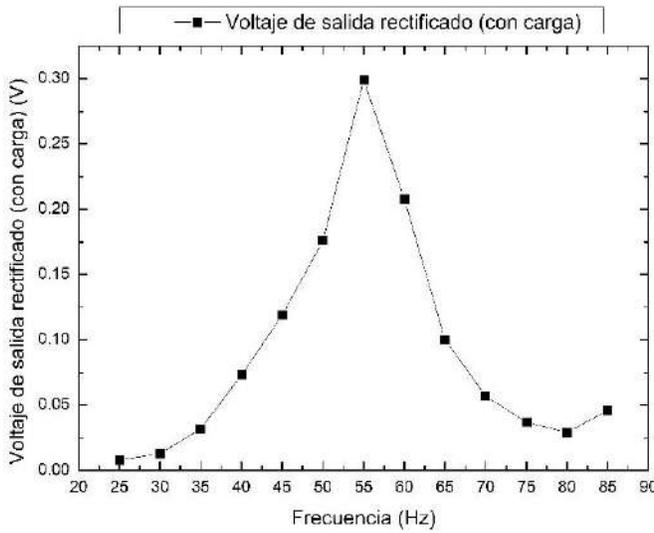
Figura 4.8 Resultados para transductor circular. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificado, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificado con carga, d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente.



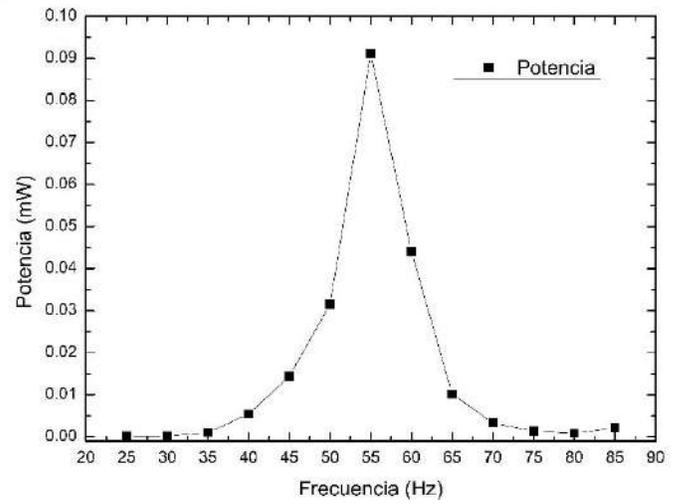
a)



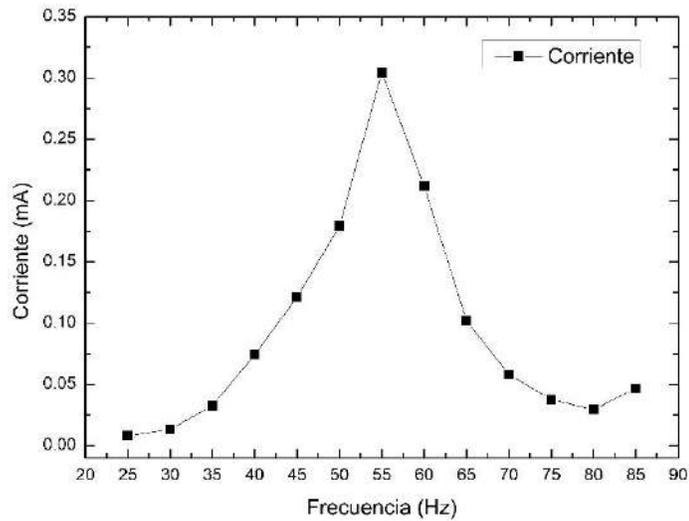
b)



c)

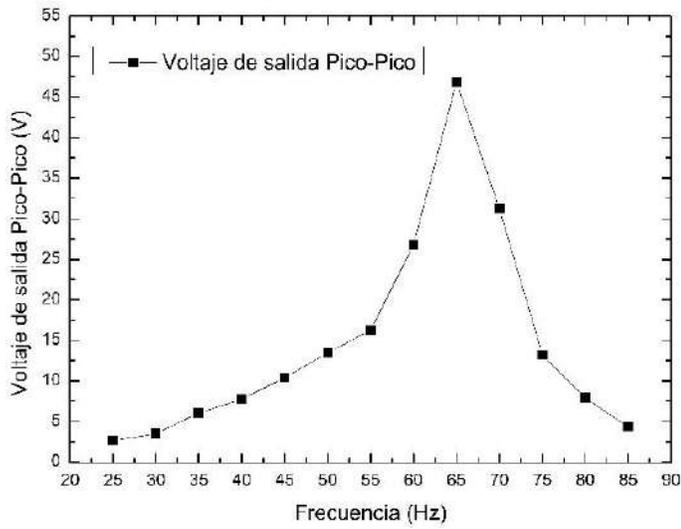


d)

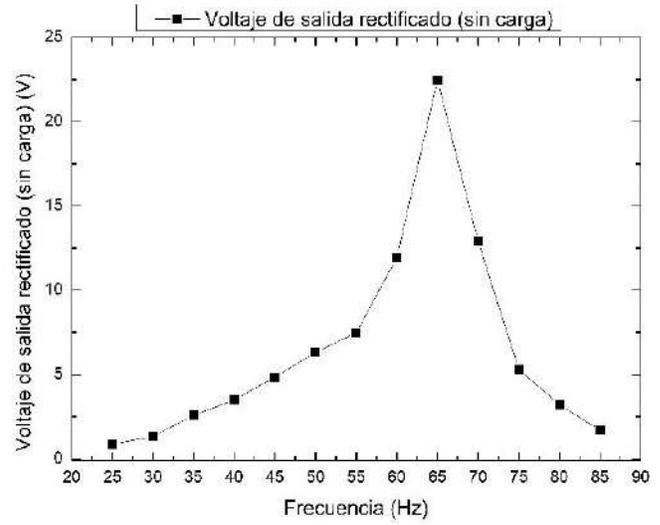


e)

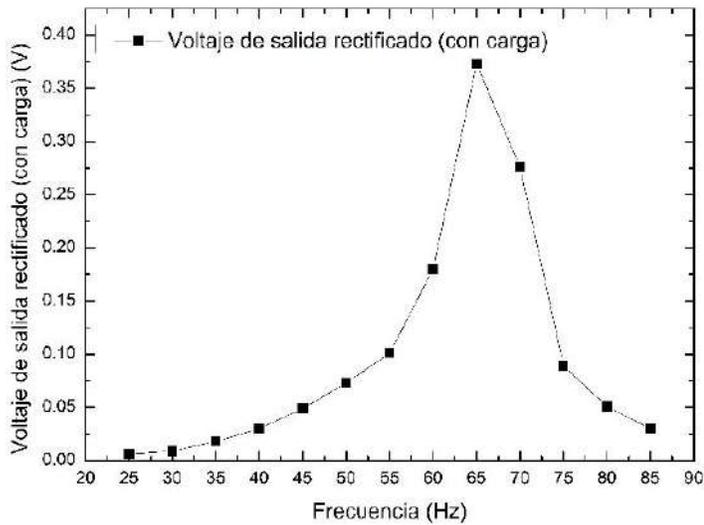
Figura 4.9 Resultados para transductor circular sin orillas. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificad, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificad con carga, d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente.



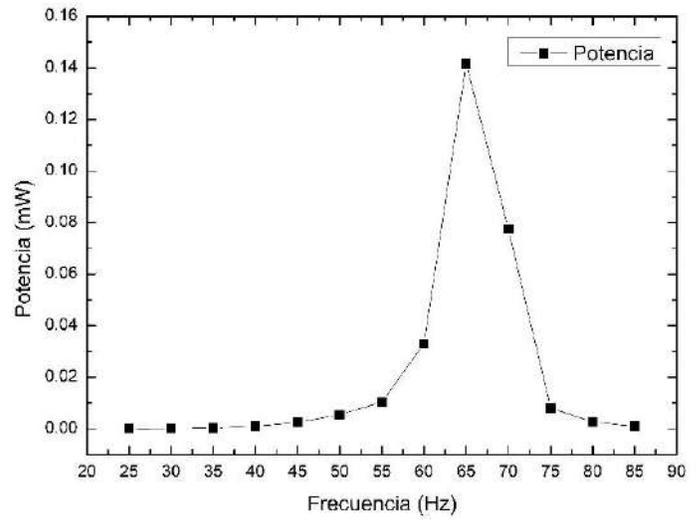
(a)



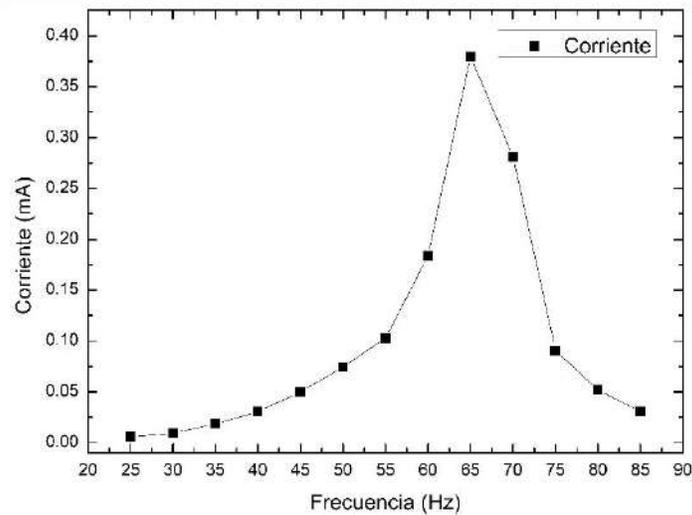
(b)



(c)



(d)



(d)

Figura 4.10 Resultados para transductor de viga en voladizo. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificado, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificado con carga, d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las gráficas de las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se observan comportamientos con incremento y decremento donde es notable la frecuencia de resonancia para 55 y 65 Hz respectivamente, obteniendo magnitudes de potencia de 0.0809, 0.0910 y 0.1416 mW, para cada geometría analizada, así como 0.2871, 0.3044 y 0.3798 mA en corriente.

Cabe señalar que, los resultados más eficientes se obtuvieron con la geometría con corte cantiléver, tomando en cuenta este análisis se propone realizar un arreglo estructural e implementar una geometría trapezoidal para mejorar la eficiencia de potencia y corriente.

Es importante mencionar que la sección con material piezoeléctrico (PZT), es fundamental en el comportamiento de Energy Harvesting por lo que, obtener dispositivos piezoeléctricos con mayor material PZT mejoraría el comportamiento y la eficiencia de la recolección de energía a partir de fuentes de vibración externa.



#### 4.5 Implementación de mejoras en el desarrollo de un cosechador de energía utilizando transductores piezoeléctricos.

Es importante mencionar que los transductores de energía (buzzers), como se había mencionado anteriormente funcionan para convertir la energía mecánica en eléctrica o viceversa, utilizando el efecto piezoeléctrico de ciertos materiales.

Los transductores piezoeléctricos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como en sensores de vibración, micrófonos, altavoces, sistemas de posicionamiento de presión y generadores de ultrasonido. Los transductores piezoeléctricos son muy útiles en aplicaciones que requieren alta precisión y estabilidad, ya que son muy sensibles a pequeñas variaciones en la señal eléctrica o mecánica.

Las vibraciones se pueden clasificar de varias formas, entre las más importantes se encuentra, la vibración libre y forzada, vibración amortiguada y no amortiguada, vibración lineal y no lineal, vibración determinística y aleatoria (Rao, 2012). Así mismo, se pueden clasificar también según sus características, origen, frecuencia, dirección, amplitud y duración. Es importante mencionar que existen distintas fuentes de energía disponibles en el entorno, algunos ejemplos se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Fuentes de energía disponibles en el entorno (Wei & Jing, 2017).

Cuerpo humano	Vehículos	Estructuras	Industria	Ambiente
Respiración, presión sanguínea, calor corporal	Aviones, UAVs, helicópteros, automóviles, trenes	Puentes, carreteras, túneles, estructuras agrícolas	Motores, compresores, enfriadores, bombas, ventiladores	Viento, radiación solar, gradientes de temperatura
Caminar, movimiento del brazo, movimiento de los dedos, trotar, nadar, hablar	Llantas, rieles, pedales, frenos, amortiguadores, turbinas	Interruptores de controles, sistemas de aire acondicionado, ductos, limpiadores	Transportadores, cortadores, mesas de vibración	Corrientes marinas, ondas acústicas, ondas electromagnéticas

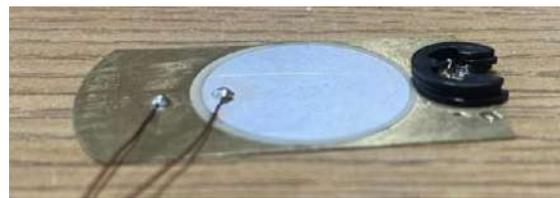
Para implementar mejoras en el arreglo para cosechamiento de energía, fue necesario realizar pruebas adicionales e independientes de la modificación de

geometría de los transductores piezoeléctricos, como agregar masas de prueba a la geometría con mayor desempeño que fue la viga en voladizo. Se muestran en la Figura 4.11 los elementos utilizados como masas de prueba, en la Tabla 4.10 se muestran también sus características. El objetivo de este estudio es verificar el decremento de la frecuencia de resonancia y así poder implementar en un arreglo mejorado.

Figura 4.11 (a) Masas de prueba independientes, (b) Geometría con mejor desempeño, con 5 masas de prueba apiladas.



a)



b)

Tabla 4.10 Dimensiones y características del transductor y la masa de prueba.

Parámetro	PZT	Latón
Dimensiones	25x0.21 mm	40.16 x 28.38 x 0.18 mm
Peso total inicial	0.77 g	1.853 g
Peso de la masa de prueba	0.261 g	0.261 g

De esta forma y bajo este análisis se determinó que la frecuencia de resonancia disminuía conforme aumentaba la masa de prueba ubicada en el extremo de la viga en voladizo, es importante mencionar que la ubicación de la masa de prueba también es importante en el análisis ya que los resultados varían conforme la masa de prueba se desplaza a lo largo de la viga en voladizo (Park, 2010).

En la Tabla 4.11, se muestran los resultados obtenidos aplicando gradualmente masa de prueba, observando que utilizar la masa 5 igual a 1.305 adicional al peso inicial de la viga en voladizo, se obtiene una corriente de 2.52 mA,



correspondiente a una frecuencia de resonancia de 35 Hz, a diferencia del generador sin masa de prueba que, a una frecuencia de resonancia de 65 Hz se obtiene una corriente de 3.79 mA, es importante mencionar que es posible variar la masa de prueba en los dispositivos para determinar a qué frecuencia de resonancia es más factible trabajar

Tabla 4.11 Resultados obtenidos aplicando masa de prueba.

Masas	Frecuencia de resonancia (Hz)	Voltaje pico-pico (V)	Voltaje de salida rectificado con carga (982 $\Omega$ ) (V)	Potencia (mW)	Corriente (mA)
$m_0$ =Original sin masa	65	46.8	0.372	0.1416792	0.37983
$m_1$ =0.261	60	50.4	0.373	0.141679226	0.379837067
$m_2$ =0.522	55	48.1	0.319	0.103626273	0.324847251
$m_3$ =0.783	45	46.2	0.318	0.141679226	0.379837067
$m_4$ =1.044	40	49.2	0.257	0.067259674	0.261710794
$m_5$ =1.305	35	54.8	0.248	0.062631365	0.252545825

En la Figura 4.12, se muestran los resultados obtenidos gráficamente, donde se observa que conforme se aumente la masa de prueba disminuirá la frecuencia de resonancia y esto a su vez disminuirá el voltaje pico-pico obtenido.

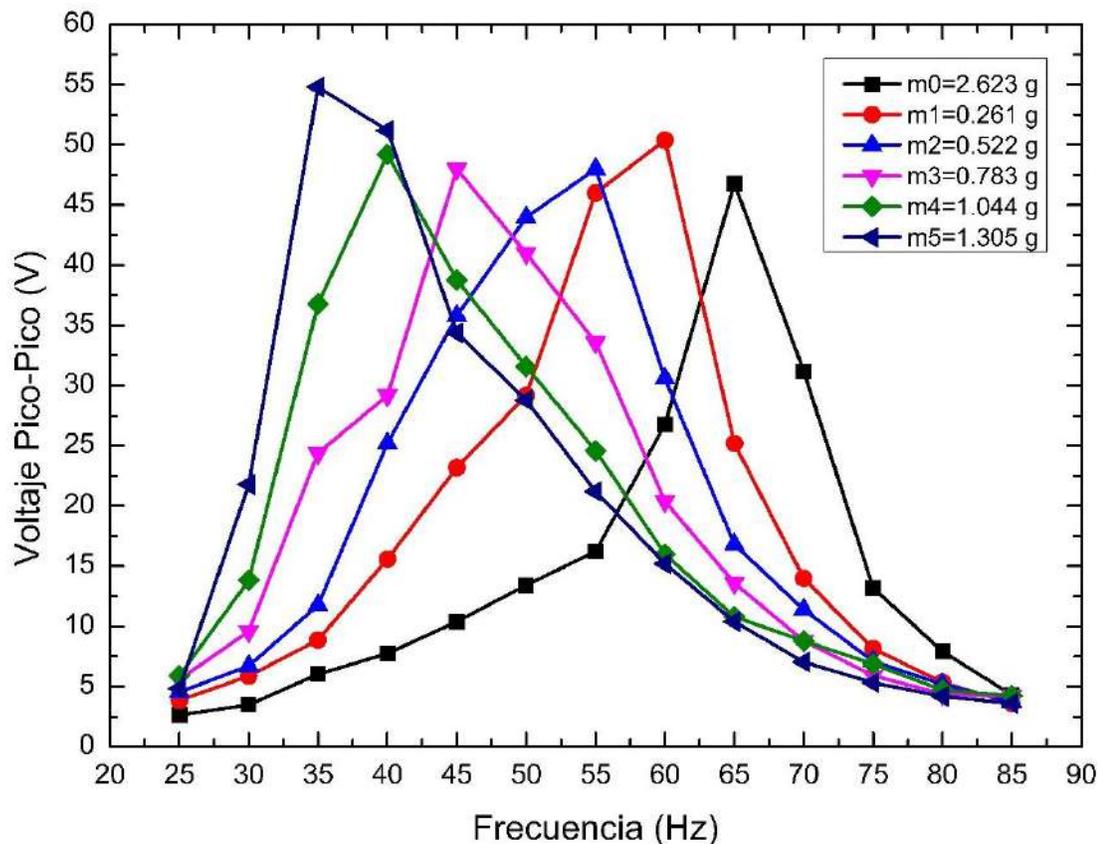


Figura 4.12 Frecuencia vs voltaje Pico-Pico (aplicando masa de prueba).

En la Figura 4.13, se muestra al dispositivo cosechador vibrando a una frecuencia de 35 Hz, generando una corriente de 0.25 mA y encendiendo 3 Leds. Cabe señalar que, a partir del análisis realizado a lo largo de este capítulo podemos determinar que, modificando la geometría de los transductores piezoeléctricos y aplicando una masa de prueba en el extremo del dispositivo cosechador es posible implementar un arreglo de transductores piezoeléctricos con una geometría con forma de trapecio como propuesta para el incremento del desempeño, así como una matriz de leds para corroborar el aumento del desempeño en el dispositivo cosechador.

Es importante mencionar que, el arreglo completo para cosechamiento de energía está conformado por varios elementos descritos anteriormente en este

capítulo, que también es posible mejorar con el objetivo de o tener un arreglo más práctico y eficiente.



Figura 4.13 Prueba de Dispositivo cosechador encendiendo 3 Leds.

Cabe destacar que, algunas fuentes de vibración que responden a una amplitud y una frecuencia, los cuales son parámetros de suma importancia, pueden ser aprovechados para la recolección de energía, para esto en la Tabla 4.12 se muestran algunas de estas fuentes de vibración que se puede determinar cuál frecuencia es óptima para poder aprovecharse en el cosechamiento de energía como se mencionó anteriormente.

Tabla 4.11 Amplitud y frecuencia de algunas fuentes de vibración (Roundy et al., n.d.; Toshiyoshi et al., 2019).

Tabla 4.12 Amplitud y frecuencia de algunas fuentes de vibración (Roundy et al., n.d.; Toshiyoshi et al., 2019).

Fuente de vibración	Amplitud de aceleración ( $m/s^2$ )	Frecuencia (Hz)
Cubierta de licuadora	6.4	121
Secadora de ropa	3.5	121



Panel de instrumentos de automóvil	3	13
Marco de puerta justo después de que la puerta se cierra	3	125
Horno de microondas pequeño	2.5	121
Ventilas de aire acondicionado en edificio de oficinas	0.2-1.5	60
Ventana junto a una calle transitada	0.7	100
Ordenador portátil mientras lee el CD	0.6	75
Vías de tren	1.078-1.568	12-16
Camión	1.96-3.43	8-15
Barco	0.98-2.45	12-13
Refrigerador	0.1	240
Persona caminando	0.4	2
Carcasa de batidora de cocina	6.4	121
Panel de instrumentos de automóvil	3	13

La energía extraída de estas fuentes de vibración mecánica se puede utilizar para alimentar periódicamente pequeños sensores inalámbricos, en la tabla 4.13 se muestran algunos ejemplos de dispositivos de bajo consumo de potencia, que pueden ser ejemplos de algunas aplicaciones para aprovechar el cosechamiento de energía.



Tabla 4.13 Consumo de potencia, corriente y voltaje de algunos dispositivos (Toshiyoshi et al., 2019), (Vullers et al., 2009).

Dispositivo	Potencia	Corriente	Voltaje
Apple Watch	52 mW RMS	15 mA	3.76 V
Bluetooth 4.0	45 mW pico	15 mA	2.0 ~ 3.6 V
Auxiliar auditivo	~ 1 mW RMS	0.67	1.4 V
Marca pasos	33 $\mu$ W RMS	13 $\mu$ A	2.5 V
Reloj analógico	2.8 $\mu$ W RMS	1.0 $\mu$ A	2.8 V
Reloj de pulsera	0.39 $\mu$ W RMS	0.25 $\mu$ A	1.55 V

Es importante mencionar que, en la literatura se especifica que la geometría de los cosechadores piezoeléctricos poder ser mejorada, implementado geometrías distintas como rectangulares, triangulares y trapezoidales (Rahimzadeh et al., 2021). Por lo tanto, se propone realizar modificaciones para incrementar el voltaje de salida y así poder obtener mejores resultados para corriente y potencia, así como, modificar la estructura del arreglo para cosechamiento de energía.

En la Figura 4.14, se muestra las mejoras que podrían realizarse para incrementar la potencia.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Figura 4.14 Secciones del arreglo experimental que pueden ser mejorados.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



# CAPITULO 5.- DISPOSITIVO COSECHADOR DE ENERGÍA



## 5. CAPITULO 5. Dispositivo cosechador de energía

### 5.1 Transductores piezoeléctricos trapezoidales

En (Rahimzadeh et al., 2021), (Roundy,2005), (Baker et al., n.d.), mencionan que geometrías como triangulares o trapezoidales pueden incrementar la eficiencia de los cosechadores de energía, se han reportado incrementos de hasta un 30 % en la eficiencia de cosechador trapezoidal en comparación con el rectangular, debido a esto se consideró realizar los cortes necesarios a los transductores piezoeléctricos con una CNC (Control Numérico Computarizado), con el objetivo se realizar cortes precisos y minimizar perdidas de corriente debido a imperfecciones en los dispositivos y obtener mayor eficiencia.

Cabe señalar que, se adaptó una nueva fuente externa (bocina), adaptado a un amplificador de sonido una base realizada en PLA, correspondiente para un arreglo en serie de transductores piezoeléctricos, que tiene como propósito incrementar la corriente generada, a partir de vibraciones continuas de baja intensidad implementado con los cambios en la geometría realizados.

Es importante mencionar que el circuito rectificador se conserva con los mismos componentes, anteriormente implementados.

### 5.2 Análisis de elementos finitos y análisis modal en ANSYS Workbench.

Se llevo a cabo un análisis de elementos finitos mediante el software ANSYS Workbench 2018, donde el proceso general consiste en:

- Definir las propiedades mecánicas de los materiales a usar en el análisis.
- Generar un modelo geométrico mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés).
- Dividir el modelo CAD en elementos unidos mediante nodos. A este proceso se le conoce como mallado de la geometría.
- Introducir las condiciones de frontera y las restricciones adecuadas.



- Ensamble y solución del modelo de elementos finitos.

En la Tabla 5.1, se muestran los parámetros de los materiales utilizados para implementar las librerías en Ansys.

*Tabla 5.1 Parámetros utilizados para obtener las formas modales del microgenerador piezoeléctrico (Valdez & Casali, 2018), (Nazeer et al., 2009), (Tseng et al., 2013), (Nia et al., 2018).*

Material	Módulo de Young (GPa)	Razón de Poisson	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Latón	97	0.3	8400
Acero	210	0.27	7750
PZT	70	0.3	7500
AlN	310	0.21	3260
ZnO	172.81	0.358	5600

En esta sección se describe el modelo de elementos finitos del generador, donde se calculan los primeros cuatro modos de vibración y sus correspondientes frecuencias de resonancia, utilizando tres tipos de materiales piezoeléctricos los cuales son: Zirconato Titanato de Plomo (PZT), Nitruro de aluminio (AlN) y Oxido de Zinc. Este modelado se desarrolló a través del software ANSYS®.

El modelo de elementos finitos se muestra en la figura 5.1. Del análisis se obtuvo que el primer modo de vibración flexionante utilizando PZT, (figura 5.1a) se presenta a 18.089 Hz, segundo (figura 5.1b), tercer (figura 5.1c) y cuarto (figura 5.1d) modo tienen frecuencias de 121.22, 394.02 y 1082.1 Hz, respectivamente.

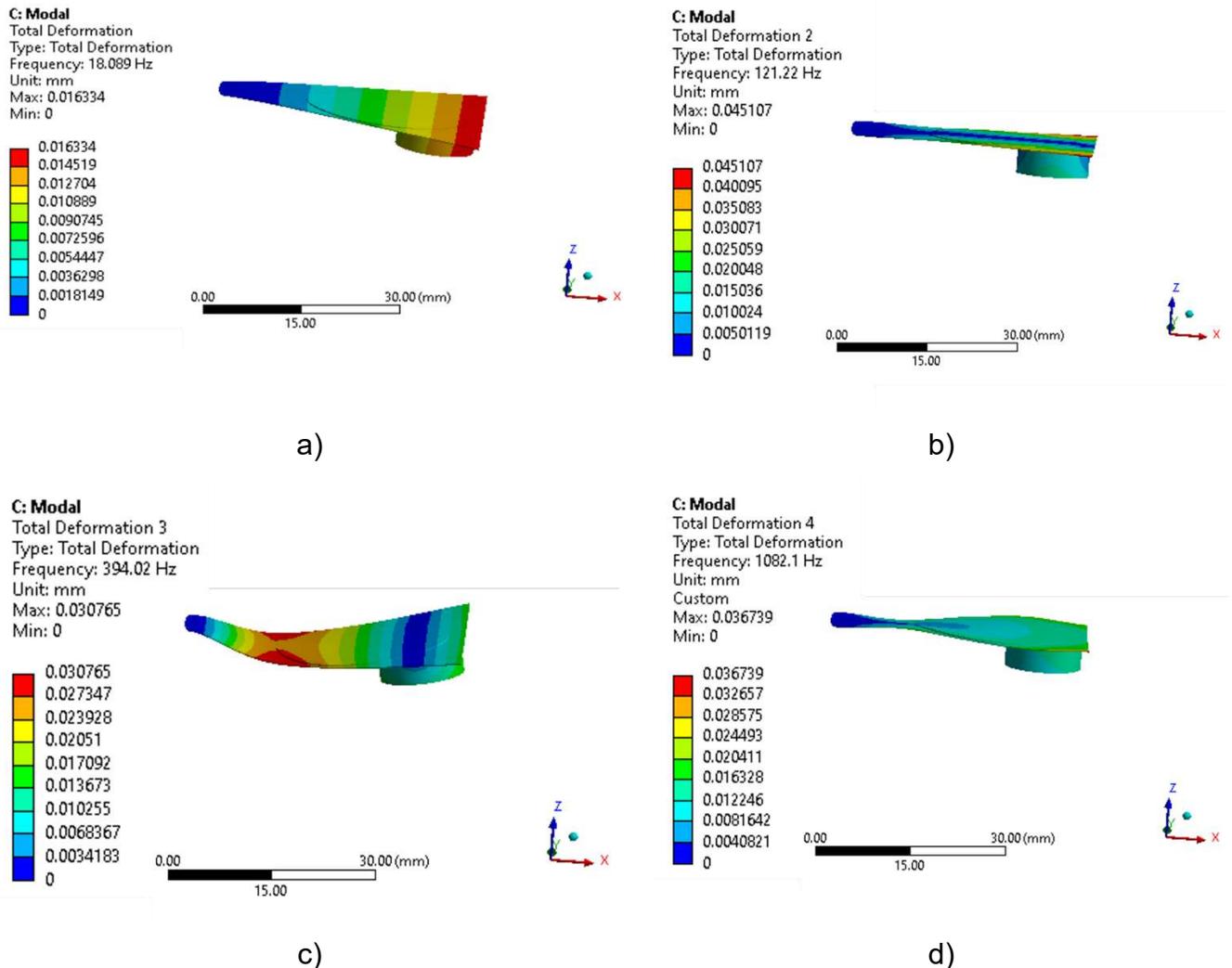
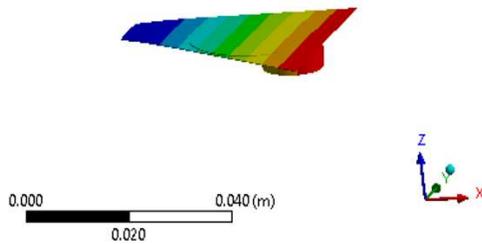


Figura 5.1 Primeros cuatro modos de vibración del generador piezoeléctrico basado en vibraciones utilizando PZT: a) primer modo (18.089 Hz), b) segundo modo (121.22 Hz), c) tercer modo (394.02 Hz) y d) cuarto modo (1082.1 Hz).

En la Figura 5.2, se muestran las cuatro primeras formas modales utilizando AIN, correspondientes a primer modo de vibración flexionante, (Figura 5.2a) se presenta a 18.655 Hz, segundo a 134.28 Hz (Figura 5.3b), tercer 477.51 (Figura 5.3c) y cuarto (Figura 5.3d) 1131.2 Hz, respectivamente.

**C: Modal**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Frequency: 18.655 Hz  
Unit: m  
17/11/2023 02:16 a. m.

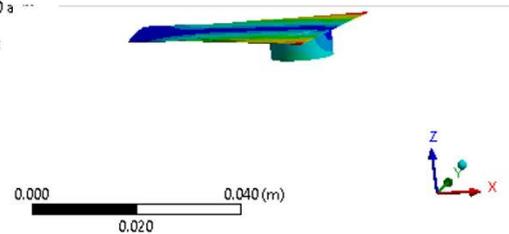
16.639 Max  
14.79  
12.942  
11.093  
9.244  
7.3952  
5.5464  
3.6976  
1.8488  
0 Min



a)

**C: Modal**  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Frequency: 134.28 Hz  
Unit: m  
17/11/2023 02:20 a. m.

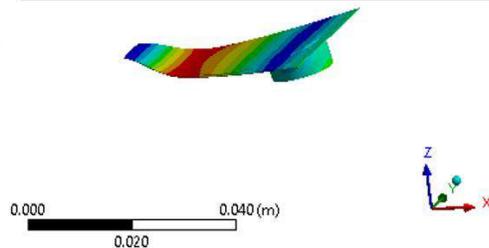
46.808 Max  
41.607  
36.406  
31.205  
26.004  
20.803  
15.603  
10.402  
5.2008  
0 Min



b)

**C: Modal**  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Frequency: 477.51 Hz  
Unit: m  
17/11/2023 02:21 a. m.

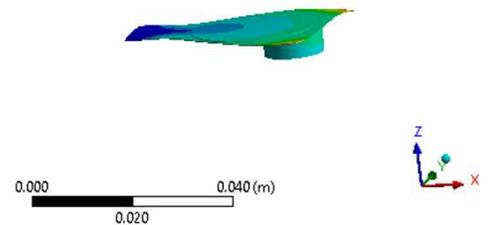
34.448 Max  
30.621  
26.793  
22.965  
19.138  
15.31  
11.483  
7.6551  
3.8276  
0 Min



c)

**C: Modal**  
Total Deformation 4  
Type: Total Deformation  
Frequency: 1131.2 Hz  
Unit: m  
17/11/2023 02:21 a. m.

41.595 Max  
36.973  
32.352  
27.73  
23.108  
18.487  
13.865  
9.2434  
4.6217  
0 Min

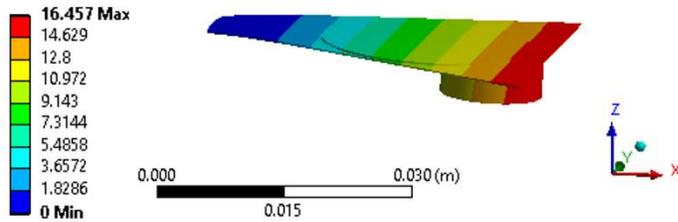


d)

Figura 5.2 Primeros cuatro modos de vibración del generador piezoeléctrico basado en vibraciones utilizando AIN.

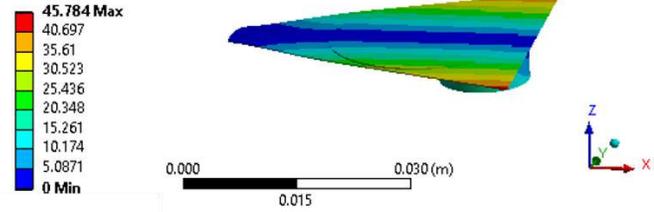
En la Figura 5.3, se muestran las cuatro primeras formas modales utilizando ZnO, correspondientes a primer modo de vibración flexionante, (Figura 5.3a) se presenta a 18.379 Hz, segundo a 128.31 Hz (Figura 5.3b), tercer 440.57 (Figura 5.3c) y cuarto (Figura 5.3d) 1105.5 Hz, respectivamente.

**C: Modal**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Frequency: 18.379 Hz  
Unit: m



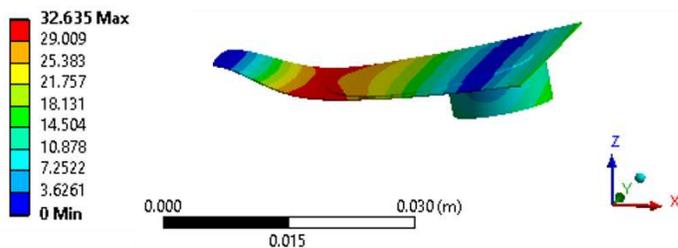
a)

**C: Modal**  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Frequency: 128.31 Hz  
Unit: m



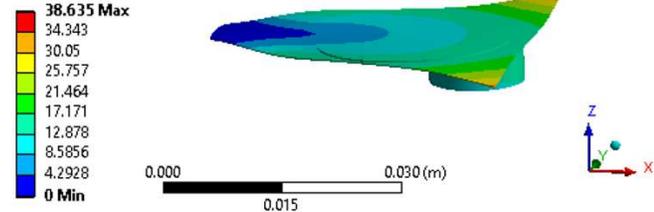
b)

**C: Modal**  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Frequency: 440.57 Hz  
Unit: m



c)

**C: Modal**  
Total Deformation 4  
Type: Total Deformation  
Frequency: 1105.5 Hz  
Unit: m



d)

Figura 5.3 Primeros cuatro modos de vibración del generador piezoeléctrico basado en vibraciones utilizando ZnO.

En la Tabla 5.2 se muestran los materiales piezoeléctricos analizados y su primera forma modal, esto con la finalidad de comparar el comportamiento de dichos materiales. Es importante mencionar que implementar el ZnO o el AlN en el Latón como material estructural requiere un procedimiento complejo debido a la poca disponibilidad del material, así como de su poca vertibilidad, a diferencia del PZT que ya viene adherido al latón en forma de buzzer o transductor piezoeléctrico. Se puede observar de la Tabla 5.2 que se tiene un comportamiento similar de su primera forma modal entre los materiales analizados.

Tabla 5.2 Comparación de materiales respecto a la primera forma modal.



Material	Primera forma modal (Hz)
<b>PZT</b>	18.089
<b>AIN</b>	18.639
<b>ZnO</b>	18.379

### 5.3 Caracterización de un transductor piezoeléctrico trapezoidal

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos implementando un barrido de frecuencias en un rango de 30-90 Hz, donde se indica la frecuencia de resonancia correspondiente a 75 Hz, que genera una potencia de 0.202 mW, con respecto a la corriente se obtiene un máximo de 0.45 mA. Cabe señalar que de acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 4.5, donde se muestra que con la geometría rectangular se habían obtenido resultados de potencia y corriente de 0.1416 mW y 0.3798 mA respectivamente, y como se mencionó anteriormente, modificando la geometría del transductor piezoeléctrico es posible incrementar hasta un 30 % la eficiencia modificando la geometría, se tiene que el incremento en el transductor piezoeléctrico trapezoidal respecto al rectangular es de 42.65 % para potencia y 18.48 % para corriente. En la figura 5.4 se muestran los resultados gráficos obtenidos para voltaje pico-pico, voltaje rectificado, voltaje rectificado con carga, potencia y corriente.

Tabla 5.3 Resultados obtenidos para transductor trapezoidal.

FRECUENCIA (Hz)	VOLTAJE PICO-PICO AC (V)	VOLTAJE DE SALIDA RECTIFICADO (V)	VOLTAJE DE SALIDA RECTIFICADO (V) CON CARGA DE 1 KΩ	POTENCIA (mW)	CORRIENTE (mA)
30	3.6	1.53	0.0139	0.000196752	0.01
35	5	2.45	0.0229	0.000534022	0.02
40	7.2	3.47	0.0318	0.001029776	0.03
45	9.8	4.7	0.0505	0.002596996	0.05
50	12.16	6	0.073	0.00542668	0.07
55	13.68	7	0.094	0.008997963	0.10
60	18	8.4	0.124	0.015657841	0.13



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

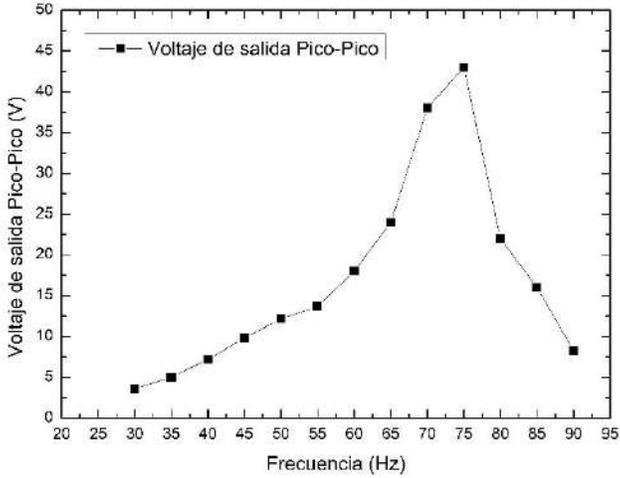
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



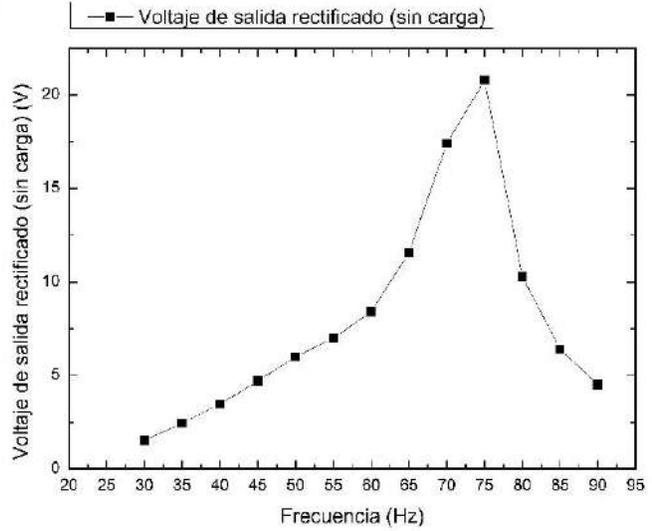
65	24	11.57	0.196	0.039120163	0.20
70	38	17.4	0.332	0.112244399	0.34
75	43	20.8	0.446	0.202562118	0.45
80	22	10.3	0.146	0.021706721	0.15
85	16	6.4	0.101	0.010387984	0.10
90	8.3	4.5	0.0389	0.001540947	0.04



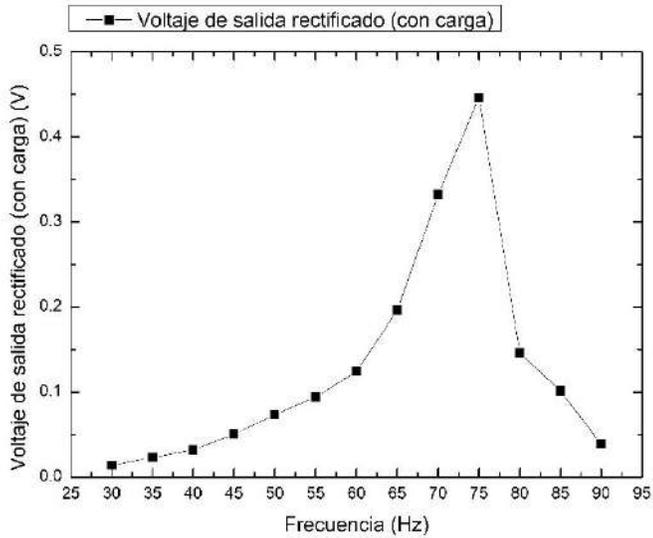
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



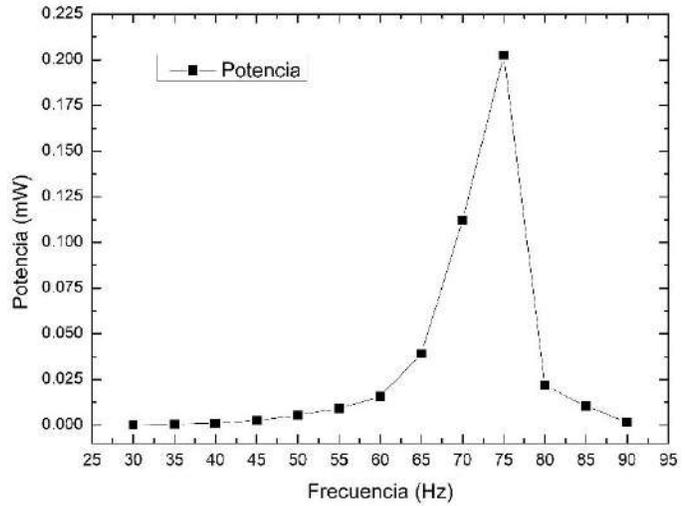
a)



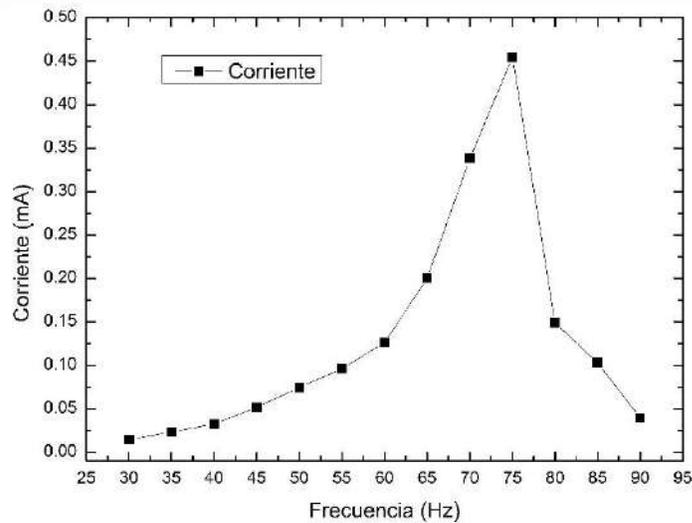
b)



c)



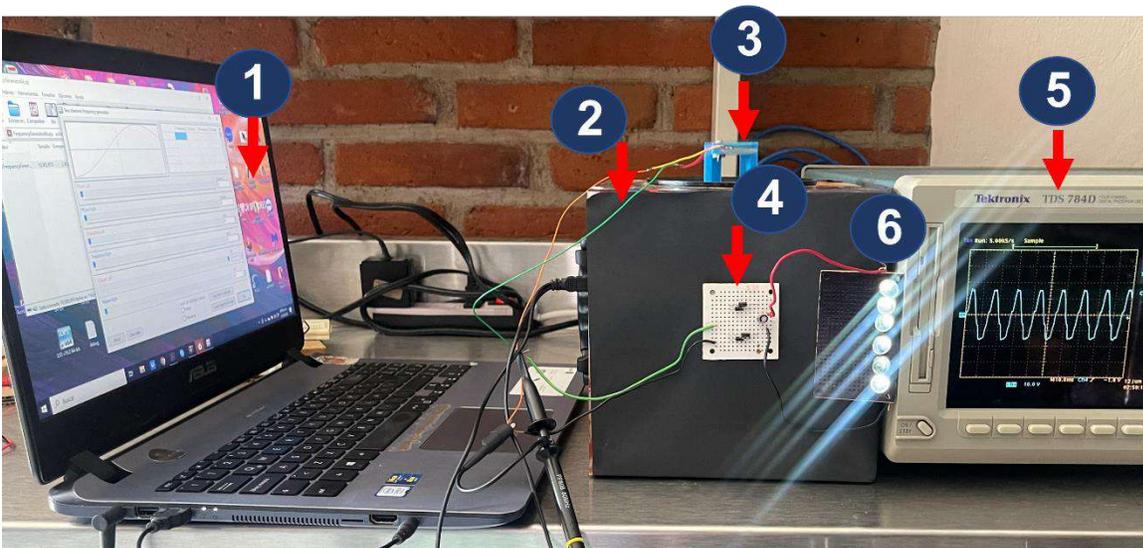
d)



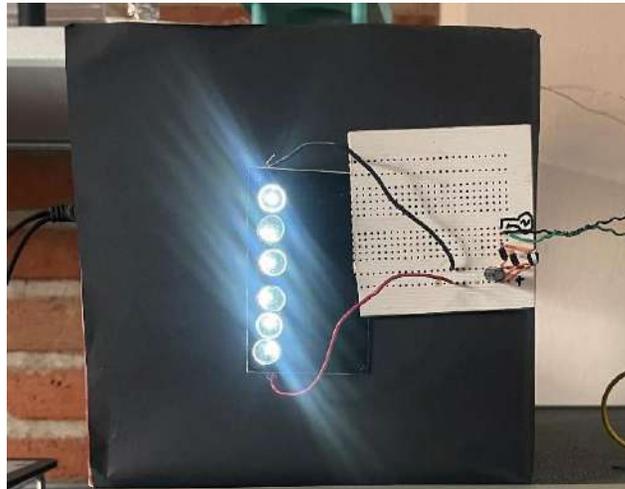
e)

Figura 5.4 Resultado obtenidos para transductor trapezoidal. a) Frecuencia vs Voltaje pico-pico, b) frecuencia vs voltaje de salida rectificado, c) frecuencia vs voltaje de salida rectificado con carga ( $1k\Omega$ ), d) frecuencia vs potencia e) frecuencia vs corriente.

En la Figura 5.5a, se muestra el arreglo preliminar con el transductor piezoeléctrico rectangular, y se aprecia como este puede lograr encender hasta 6 Leds (Figura 5.5b).



a)



b)

Figura 5.5 a) Arreglo preliminar con el transductor piezoeléctrico optimizado, b) 6 Leds encendidos a una frecuencia de resonancia de 75 Hz.

El arreglo para caracterización del transductor piezoeléctrico trapezoidal se conforma por los siguientes elementos.

1. Generador de frecuencias
2. Bocina
3. Transductor piezoeléctrico
4. Circuito rectificador
5. Osciloscopio
6. LEDS

#### 5.4 Configuración de la propuesta mejorada de un sistema de cosechador de energía.

En la Figura 5.6 se muestra el diagrama esquemático y en la Figura 5.7 se presenta el arreglo experimental mejorado implementando un arreglo de 4 transductores piezoeléctricos en una nueva base realizada en impresión 3D conformada por los siguientes elementos:

1. Fuente de alimentación
2. Generador de frecuencia
3. Amplificador de audio
4. Fuente de vibración (bocina)
5. Base adaptada para la fijación del transductor piezoeléctrico.
6. Transductor piezoeléctrico
7. Osciloscopio
8. Circuito rectificador
9. Unidad de aplicación
10. Multímetro para medición de corriente
11. Multímetro para medición de voltaje

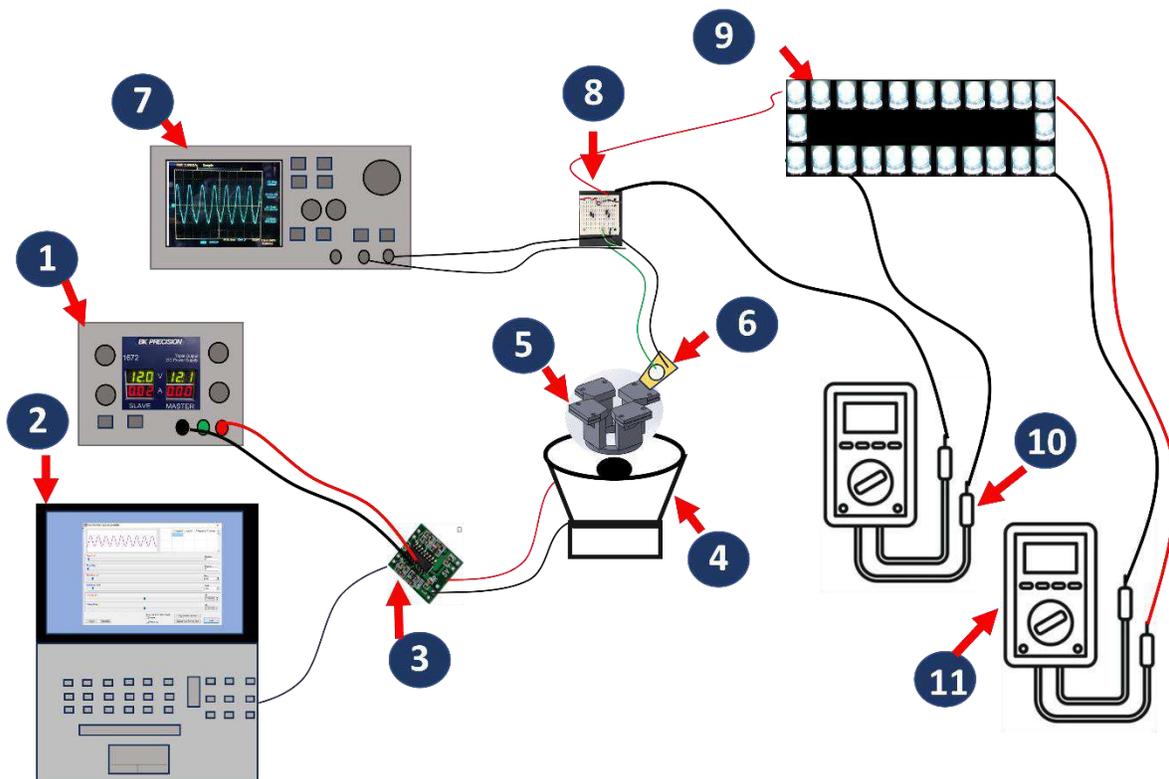


Figura 5.6 Diagrama esquemático.

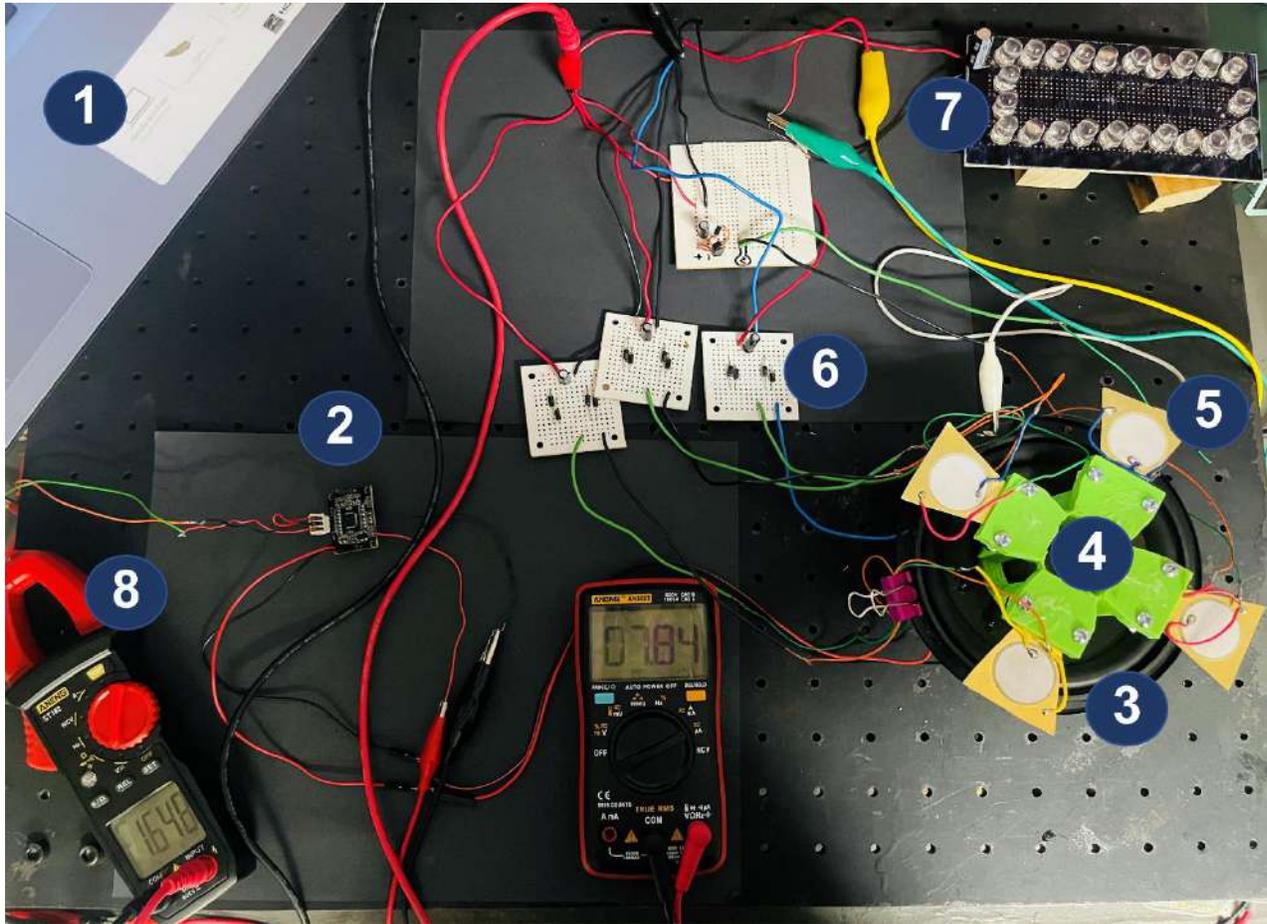
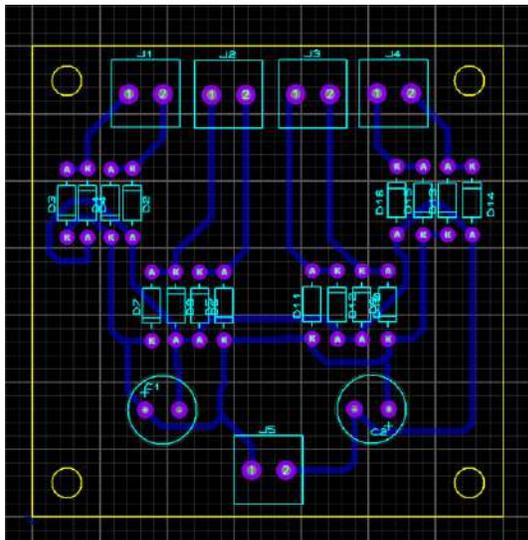
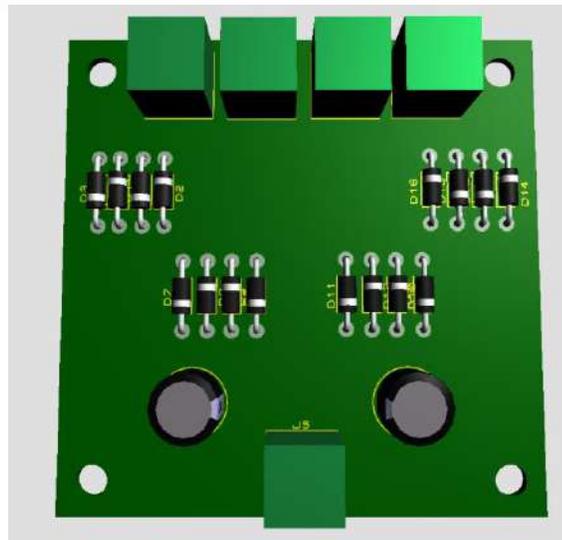


Figura 5.7 Arreglo experimental.

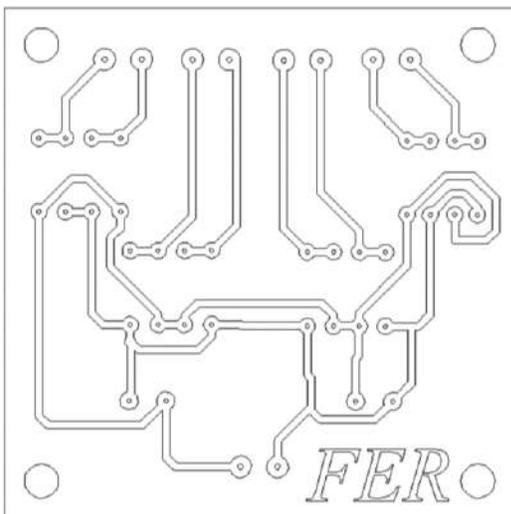
Se implementaron mejoras en algunos puntos del arreglo experimental como fue el número 2 y 6 correspondientes al amplificador de audio y los circuitos rectificadores, el amplificador de audio se reemplazó por uno de mejor calidad y los circuitos rectificadores fueron hechos en una placa PCB uniendo los 4 circuitos en uno y optimizando espacios, en la Figura 5.8 se muestra el proceso del circuito realizado en el software *Proteus* y maquinado en una CNC. Posteriormente en la Figura 5.9 se muestra el arreglo experimental mejorado.



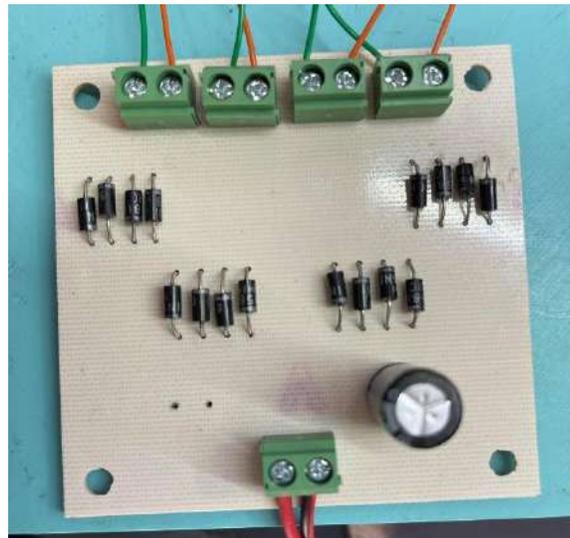
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.8 Proceso del circuito realizado en Proteus. a) Pistas generadas en el software, b) simulación del circuito, c) imagen vectorizada para grabado en CNC y d) circuito final con sus respectivos componentes.

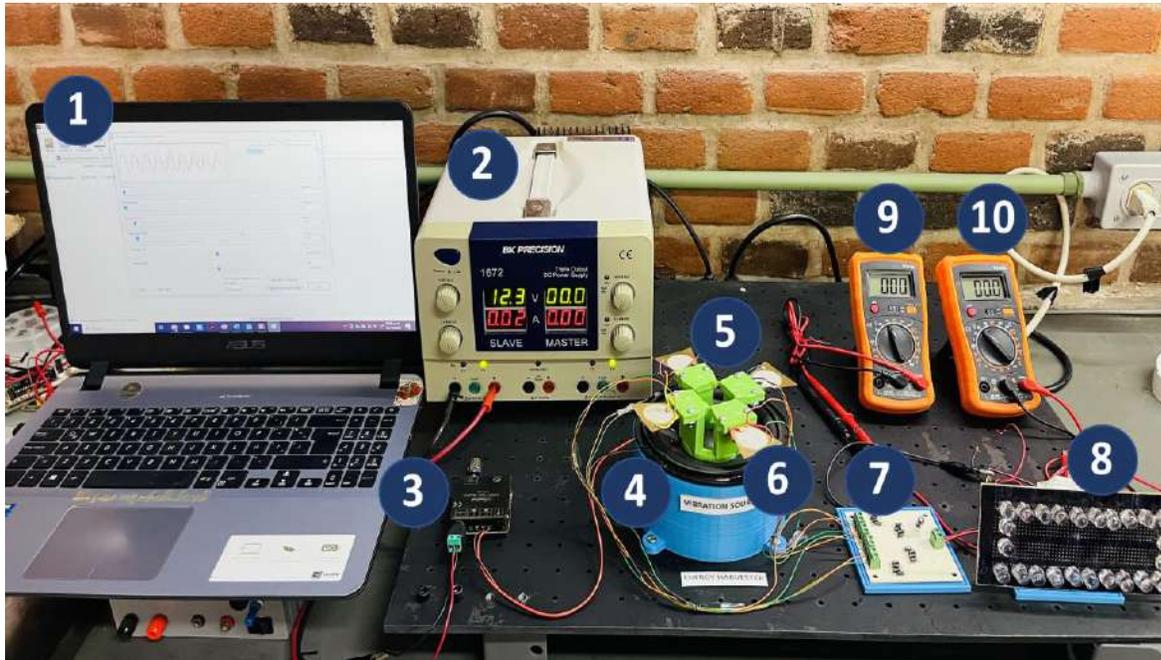


Figura 5.9 Arreglo experimental final.

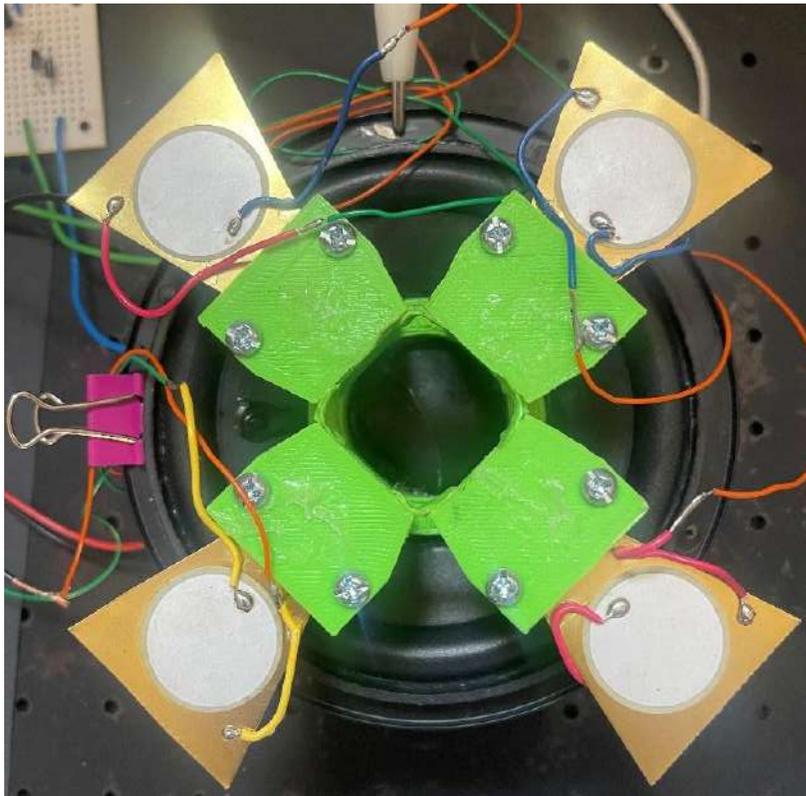


Figura 5.10 Base de soporte en PLA para un arreglo de 4 transductores trapezoidales.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Es importante mencionar que la mayoría de los elementos que conforman el arreglo son reciclados, como los componentes del circuito rectificador, los cables que unen a los transductores piezoeléctricos, la fuente de poder y la bocina.

El objetivo de modificar el arreglo inicial es aumentar la eficiencia con respecto a la potencia y corriente que genera el cosechador de energía. Cabe señalar que los principales elementos que se modificaron fue la base para los transductores piezoeléctricos elaborada con PLA (Figura 5.10), con la finalidad de tener un soporte para un arreglo en paralelo de los transductores piezoeléctricos cortados en forma trapezoidal como se mencionó anteriormente ya que estos tienen el mejor comportamiento con relación a potencia y corriente, otro elemento que se reemplazo fue la bocina o shaker esto con el fin de tener mejor dominio del dispositivo con respecto a poder manipular la posición en que la pueda estar sujeta, además de que esta bocina es reciclada y tiene mayor potencia lo que genera mayor vibración y mayor amplitud a la anterior. Con respecto a los otros elementos del arreglo como el circuito rectificador, osciloscopio, y generador de frecuencias no fue necesario reemplazarlos, únicamente se agregó una fuente de poder.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



# CAPITULO 6.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES



## 6. CAPÍTULO 6. RESULTADOS

### 6.1 Resultados

De acuerdo con las primeras pruebas realizadas se determina que existen perdidas en distintos puntos del dispositivo cosechador dado por movimientos mecánicos no deseados en el bocina, además de que cada transductor vibra en diferente tiempo, a diferente frecuencia de resonancia, esto ocasiona que las señales estén desfasadas para los todos los transductores y al estar conectados en paralelo estas se cancelan debido a interferencia destructiva y no generan corriente, por lo que es necesario realizar ajustes relacionados a probar a los transductores individualmente para determinar cuál es el arreglo y conexión más adecuado para poder así cosechar la suficiente corriente y potencia para su posterior almacenamiento. Es así como se determinó que cada transductor tuviera su propio circuito rectificador y posteriormente conectar sus terminales en paralelo, ya que cualquier desfase en amplitud, tiempo y frecuencia podría generar error. Es importante mencionar que, debido a la frecuencia de resonancia elevada, fue necesario implementar también una masa de prueba de 0.85 gramos en el extremo fijo del transductor piezoeléctrico trapezoidal con el objetivo de minimizar la frecuencia de resonancia y evitar daños en los dispositivos cosechadores. La frecuencia de resonancia del generador puede variarse de tal modo que se pueda aprovechar la energía de las vibraciones de otras fuentes de vibración disponibles en el entorno. Esta variación se puede lograr al aumentar o disminuir el tamaño de la masa de prueba o la rigidez de la viga trapezoidal. Por lo tanto, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.1.

*Tabla 6.1 Resultados obtenidos para arreglo de transductores piezoeléctricos trapezoidales.*

<b>Frecuencia resonancia (Hz)</b>	<b>Voltaje CD (V)</b>	<b>Corriente directa (mA)</b>	<b>Potencia (mW)</b>
18	2.54	0.612	1.5113

Utilizando un arreglo de transductores piezoeléctricos trapezoidales adaptados a una base diseñada en un software de dibujo, y posteriormente impresa en 3D utilizando PLA (Ácido Poliláctico), implementada en una bocina cuya frecuencia aplicada fue de 16 Hz correspondiente a la frecuencia de resonancia, y conectados a circuitos rectificadores en paralelo se tiene que, de acuerdo con la Tabla 6.1 se obtuvo un voltaje de 2.54, una corriente de 0.612 mA y una potencia de 1.5113 mW, lo que posibilita su implementación para alimentar a dispositivos electrónicos de bajo consumo tales como reloj de pulsera, calculadoras sencillas, microcontroladores, sensores de temperatura, marcapaso entre otras aplicaciones. Es importante mencionar que es posible almacenar la energía recolectada en pilas o utilizarse de forma directa.

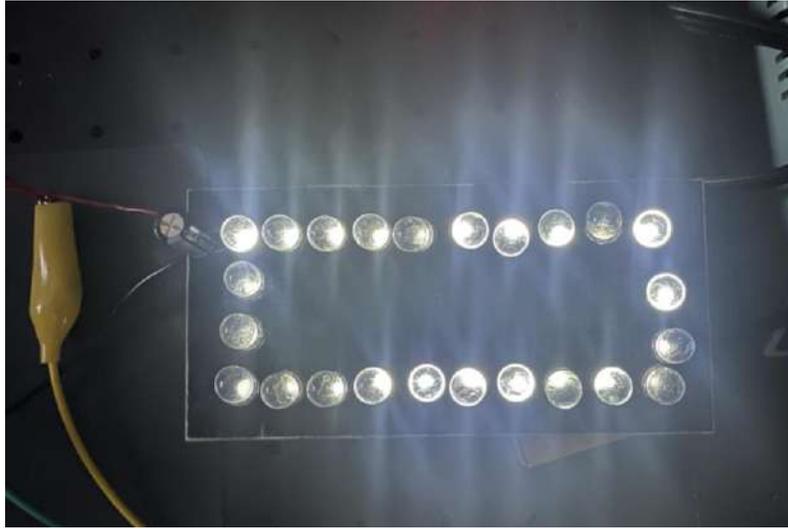
El primer valor de frecuencia modal fue de 18.089 Hz, obtenido numéricamente, mientras que del análisis experimental fue de 18 Hz, por lo tanto, existe un error porcentual de 0.49 %.

Considerando el arreglo de 4 transductores trapezoidales, la potencia generada con este novedoso cosechador permite energizar diferentes dispositivos de baja potencia como los que se muestran en las Figuras 6.1a, 6.1b, 6.1c, 6.1d y 6.1e.

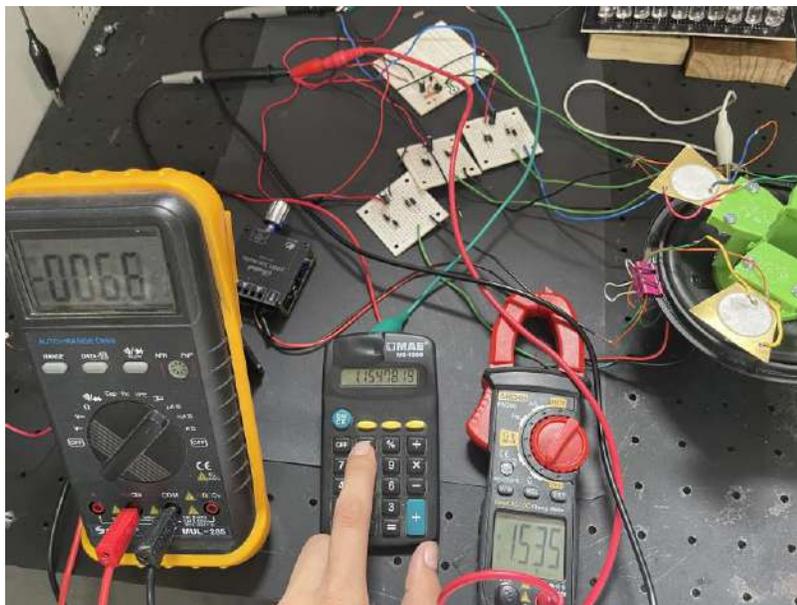




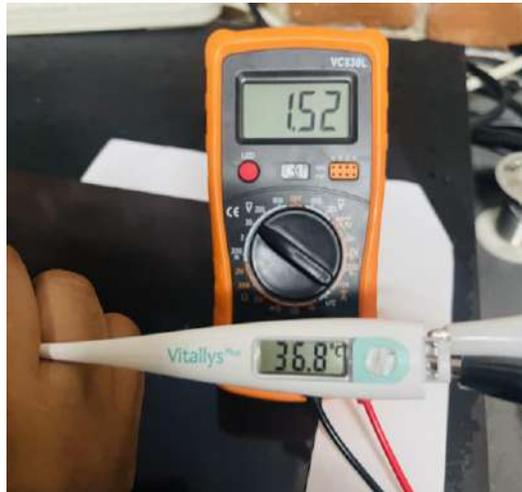
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.1 Potencia de salida del recolector de energía utilizado para energizar (a) un reloj de pulsera, (b) 24 LEDs, (c) una calculadora básica, (d) termómetro y (e) foco Led.

La Tabla 6.2 resume la frecuencia, la corriente, el voltaje y la potencia utilizados para energizar 24 LEDs y otros dispositivos de bajo consumo.



Tabla 6.2 Resultados obtenidos para un arreglo de 4 transductores de forma trapezoidal.

Dispositivo	Frecuencia de resonancia (Hz)	Corriente directa	Voltaje DC (V)	Potencia
24 leds	18	0.612 mA	2.54	1.5113 mW
Reloj de pulsera	18	0.29 $\mu$ A	1.36	0.394 $\mu$ W
Calculadora básica	18	6.8 $\mu$ A	1.5	10.43 $\mu$ W
Termómetro	18	0.41 mA	1.7	0.697 mW
Foco LED	18	0.395 $\mu$ A	7	2.765



## 7. CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

### 7.1 Conclusiones

Con dispositivos de bajo costo comúnmente utilizados en electrónica, los generadores piezoeléctricos se pueden diseñar, optimizar e implementar para energizar dispositivos electrónicos de baja potencia. También es posible obtener una mayor potencia implementando un conjunto de transductores más y realizando modificaciones en la geometría, así como en la base de apoyo.

Se ha demostrado que la frecuencia de resonancia disminuye a medida que aumenta la masa de prueba. Entonces, variar la masa de prueba es una estrategia útil para reducir el valor de operación de frecuencia, haciendo posible el uso de varias fuentes de vibraciones de muy baja frecuencia.

Se valida el incremento de la energía recolectada mediante geometrías trapezoidales.

El prototipo desarrollado es novedoso, con bajo costo de implementación, y hasta cierto punto sostenible ya que está compuesto por varios elementos recuperados de residuos electrónicos, las bases fueron hechas con material biodegradable.

Los resultados experimentales para la primera frecuencia modal son adecuados ya que la comparación con los resultados numéricos tiene un error porcentual aceptable (0.47%).



## 8. Bibliografía

- Akin-Ponnle, A. E., & Carvalho, N. B. (2021). Energy harvesting mechanisms in a smart city—a review. In *Smart Cities* (Vol. 4, Issue 2, pp. 476–498). MDPI. <https://doi.org/10.3390/smartcities4020025>
- Al-Yafeai, D., Darabseh, T., & Mourad, A. H. I. (2020). A state-of-the-art review of car suspension-based piezoelectric energy harvesting systems. In *Energies* (Vol. 13, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en13092336>
- Andosca, R., McDonald, T. G., Genova, V., Rosenberg, S., Keating, J., Benedixen, C., & Wu, J. (2012). Experimental and theoretical studies on MEMS piezoelectric vibrational energy harvesters with mass loading. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 178, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.02.028>
- Anton, S. R., & Sodano, H. A. (2007). A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart Materials and Structures*, 16(3). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/3/R01>
- Asad Sarwar Qureshi, B., & Nawab, A. (n.d.). *Symposium on Role of Engineers in Economic Development and Policy Formulation THE ROLE OF ENGINEERS IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT*.
- Baker, J., Roundy, S., & Wright, P. P. (n.d.). *Alternative Geometries for Increasing Power Density in Vibration Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*.
- Beeby, S. P., Tudor, M. J., & White, N. M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 17(12). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>
- Castagnetti, D. (2011). Fractal-inspired multifrequency structures for piezoelectric harvesting of ambient kinetic energy. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 133(11). <https://doi.org/10.1115/1.4004984>
- Circular Piezo Ceramic Actuators (unimorph and bimorph actuator)*. (n.d.). [www.piezodirect.com](http://www.piezodirect.com)
- Cook, B. W., Lanzisera, S., & Pister, K. S. J. (2006). SoC issues for RF smart dust. *Proceedings of the IEEE*, 94(6), 1177–1195. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.873620>
- Cook-Chennault, K. A., Thambi, N., & Sastry, A. M. (2008). Powering MEMS portable devices - A review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*, 17(4). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/4/043001>
- Costanzo, S., Venneri, F., Dimassa, G., Borgia, A., Costanzo, A., & Raffo, A. (2016). Fractal reflectarray antennas: State of art and new opportunities. In *International Journal of Antennas and Propagation* (Vol. 2016). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2016/7165143>



- Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Piezoelectric energy harvesting solutions: A review. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Issue 12, pp. 1–37). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s20123512>
- Curie, J., & Curie, P. (1880). Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Bulletin de La Société Minéralogique de France*, 3(4), 90–93. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1880.1564>
- Deng, J., Guasch, O., Zheng, L., Song, T., & Cao, Y. (2021). Semi-analytical model of an acoustic black hole piezoelectric bimorph cantilever for energy harvesting. *Journal of Sound and Vibration*, 494. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115790>
- Elfrink, R., Kamel, T. M., Goedbloed, M., Matova, S., Hohlfeld, D., van Andel, Y., & van Schaijk, R. (2009). Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(9). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/9/094005>
- Elvira-Hernández, E. A., Anaya-Zavaleta, J. C., Martínez-Cisneros, E., López-Huerta, F., Aguilera-Cortés, L. A., & Herrera-May, A. L. (2020). Electromechanical modeling of vibration-based piezoelectric nanogenerator with multilayered cross-section for low-power consumption devices. *Micromachines*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/M11090860>
- Erturk, A., & Inman, D. J. (2009a). An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Materials and Structures*, 18(2). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/2/025009>
- Erturk, A., & Inman, D. J. (2009b). An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Materials and Structures*, 18(2). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/2/025009>
- Friswell, M. I., & Adhikari, S. (2010). Sensor shape design for piezoelectric cantilever beams to harvest vibration energy. *Journal of Applied Physics*, 108(1). <https://doi.org/10.1063/1.3457330>
- Harb, A. (2011). Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, 36(10), 2641–2654. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>
- Howells, C. A. (2009). Piezoelectric energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1847–1850. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.02.020>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers, & IEEE Robotics and Automation Society. (n.d.). *MEMS 2015 : The 28th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems : 18-22 January 2015, Estoril, Portugal*.
- Isarakorn, D., Briand, D., Janphuang, P., Sambri, A., Gariglio, S., Triscone, J. M., Guy, F., Reiner, J. W., Ahn, C. H., & de Rooij, N. F. (2011). The realization and performance of vibration energy harvesting MEMS devices based on an epitaxial piezoelectric thin film. *Smart Materials and Structures*, 20(2). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/2/025015>



- Izadgoshasb, I., Lim, Y. Y., Lake, N., Tang, L., Padilla, R. V., & Kashiwao, T. (2018). Optimizing orientation of piezoelectric cantilever beam for harvesting energy from human walking. *Energy Conversion and Management*, 161, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.076>
- Jiang, X., Li, Y., Li, J., Wang, J., & Yao, J. (2014). Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(4). <https://doi.org/10.1063/1.4891169>
- Kamarudin, S. K., Daud, W. R. W., Ho, S. L., & Hasran, U. A. (2007). Overview on the challenges and developments of micro-direct methanol fuel cells (DMFC). In *Journal of Power Sources* (Vol. 163, Issue 2, pp. 743–754). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.081>
- Kang, M. G., Jung, W. S., Kang, C. Y., & Yoon, S. J. (2016). Recent progress on PZT based piezoelectric energy harvesting technologies. In *Actuators* (Vol. 5, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/act5010005>
- Kawai H., (1969) The piezoelectricity of Poly (Vinylidene Flouride). *Japan. J. APPL. PHYS.* (Vol. 8,), 975-976.
- Kim, H. S., Kim, J. H., & Kim, J. (2011). A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), 1129–1141. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0151-3>
- Kong, L. B., Li, T., Hng, H. H., Boey, F., Zhang, T., & Li, S. (n.d.). *Lecture Notes in Energy 24 Waste Energy Harvesting Mechanical and Thermal Energies*. <http://www.springer.com/series/8874>
- Kouravand, S. (2011). Design and modeling of some sensing and actuating mechanisms for MEMS applications. *Applied Mathematical Modelling*, 35(10), 5173–5181. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.04.015>
- Kurmendra, & Kumar, R. (2017). Design analysis, modeling and simulation of novel rectangular cantilever beam for MEMS sensors and energy harvesting applications. *International Journal of Information Technology (Singapore)*, 9(3), 295–302. <https://doi.org/10.1007/s41870-017-0035-6>
- Leadham, S., & Erturk, A. (2015). Unified nonlinear electroelastic dynamics of a bimorph piezoelectric cantilever for energy harvesting, sensing, and actuation. *Nonlinear Dynamics*, 79(3), 1727–1743. <https://doi.org/10.1007/s11071-014-1770-x>
- Lee, B. S., Lin, S. C., Wu, W. J., Wang, X. Y., Chang, P. Z., & Lee, C. K. (2009). Piezoelectric MEMS generators fabricated with an aerosol deposition PZT thin film. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(6). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/6/065014>
- Lee, H., Kim, H., Kim, D. Y., & Seo, Y. (2019). Pure Piezoelectricity Generation by a Flexible Nanogenerator Based on Lead Zirconate Titanate Nanofibers. *ACS Omega*, 4(2), 2610–2617. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03325>



- Lee, L. T., Mohamed, M. A., Yahya, I., Kulothungan, J., Muruganathan, M., & Mizuta, H. (2018). Comparison of piezoelectric energy harvesting performance using silicon and graphene cantilever beam. *Microsystem Technologies*, 24(9), 3783–3789. <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3857-7>
- Li, H., Tian, C., & Deng, Z. D. (2014). Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 1, Issue 4). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.4900845>
- Lippmann, G. (1882). "Principe de la conservation de l'électricité the principle of the conservation of electricity. In *Ann. de chim. et phys* (Issue 5).
- Litak, G., Friswell, M. I., & Adhikari, S. (2010). Magnetopiezoelectric energy harvesting driven by random excitations. *Applied Physics Letters*, 96(21). <https://doi.org/10.1063/1.3436553>
- Liu, H., Zhong, J., Lee, C., Lee, S. W., & Lin, L. (2018). A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 5, Issue 4). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.5074184>
- Ma, T., Ding, Y., Wu, X., Chen, N., & Yin, M. (2021). Research on piezoelectric vibration energy harvester with variable section circular beam. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 40(2), 753–771. <https://doi.org/10.1177/1461348420918408>
- Marzencki, M., Ammar, Y., & Basrou, S. (2008). Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 145–146(1–2), 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.073>
- Minh, L. van, Hara, M., Horikiri, F., Shibata, K., Mishima, T., & Kuwano, H. (2013). Bulk micromachined energy harvesters employing (K, Na)NbO<sub>3</sub> thin film. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23(3). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/23/3/035029>
- Mishra, S., Unnikrishnan, L., Nayak, S. K., & Mohanty, S. (2019a). Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: A Systematic Review. In *Macromolecular Materials and Engineering* (Vol. 304, Issue 1). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/mame.201800463>
- Mishra, S., Unnikrishnan, L., Nayak, S. K., & Mohanty, S. (2019b). Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: A Systematic Review. In *Macromolecular Materials and Engineering* (Vol. 304, Issue 1). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/mame.201800463>
- Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S., & Green, T. C. (2008). Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 96(9), 1457–1486. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.927494>



- Mohammadi, F., Khan, A., & Cass, R. B. (2002). Power Generation from Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Fiber Composites. *MRS Proceedings*, 736, D5.5. <https://doi.org/10.1557/PROC-736-D5.5>
- Narita, F., & Fox, M. (2018). A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications. In *Advanced Engineering Materials* (Vol. 20, Issue 5). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adem.201700743>
- Nazeer, H., Abelman, L., Siekman, M. H., & Elwenspoek, M. C. (2009). *Determination of young's modulus of PZT and Co80Ni20 thin films by means of micromachined cantilevers Macroscopic Self-assembly View project 3T MATAS View project*. <https://www.researchgate.net/publication/241884580>
- Nia, E. M., Zawawi, N. A. W. A., & Singh, B. S. M. (2018). A review of walking energy harvesting using piezoelectric materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 291(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/291/1/012026>
- Park, J.-H. (2010). *Development of MEMS Piezoelectric Energy Harvesters*.
- Pi. (n.d.). *Piezoelectric Solutions: Piezo Components & Materials, Piezo Actuators & Transducers, Piezo Actuator Tutorial*.
- Platt, S. R., Farritor, S., Garvin, K., & Haider, H. (2005). The use of piezoelectric ceramics for electric power generation within orthopedic implants. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(4), 455–461. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2005.852482>
- Platt, S. R., Farritor, S., & Haider, H. (2005). On Low-frequency electric power generation with PZT ceramics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(2), 240–252. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2005.844704>
- Rahimzadeh, M., Samadi, H., & Mohammadi, N. S. (2021). Analysis of energy harvesting enhancement in piezoelectric unimorph cantilevers. *Sensors*, 21(24). <https://doi.org/10.3390/s21248463>
- Renaud, M., Fiorini, P., van Schaijk, R., & van Hoof, C. (2012). Erratum: Harvesting energy from the motion of human limbs: The design and analysis of an impact-based piezoelectric generator (Smart Materials and Structures (2009) 18 (035001)). In *Smart Materials and Structures* (Vol. 21, Issue 4). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/4/049501>
- Roshani, H., Dessouky, S., Montoya, A., & Papagiannakis, A. T. (2016). Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study. *Applied Energy*, 182, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.116>
- Roundy, S., Wright, P. K., & Rabaey, J. (n.d.). *A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes*. [www.elsevier.com/locate/comcom](http://www.elsevier.com/locate/comcom)
- S, K. K. (n.d.). *DESIGN AND ANALYSIS OF A MICROCANTILEVER SYSTEM FOR A VIBRATION BASED MEMS PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER*. <https://doi.org/10.24327/ijcar.2017.5681.0777>



- Shepelin, N. A., Glushenkov, A. M., Lussini, V. C., Fox, P. J., Dicoski, G. W., Shapter, J. G., & Ellis, A. v. (2019). New developments in composites, copolymer technologies and processing techniques for flexible fluoropolymer piezoelectric generators for efficient energy harvesting. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 12, Issue 4, pp. 1143–1176). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c8ee03006e>
- Sodano, H. A., Inman, D. J., & Park, G. (2005). Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10), 799–807. <https://doi.org/10.1177/1045389X05056681>
- Thiruvvelsvam, S. K. (n.d.). *Energy Harvesting From A Piezoelectric Source To Power A Wireless System*.
- Toprak, A., & Tigli, O. (2015). MEMS Scale PVDF-TrFE-Based Piezoelectric Energy Harvesters. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 24(6), 1989–1997. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2015.2457782>
- Torfs, T., Leonov, V., & van Hoof, C. (2006). Body-Heat Powered Autonomous Pulse Oximeter. In *IEEE SENSORS*.
- Toshiyoshi, H., Ju, S., Honma, H., Ji, C. H., & Fujita, H. (2019). MEMS vibrational energy harvesters. In *Science and Technology of Advanced Materials* (Vol. 20, Issue 1, pp. 124–143). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1569828>
- Tseng, H. J., Tian, W. C., & Wu, W. J. (2013). Flexible PZT thin film tactile sensor for biomedical monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 13(5), 5478–5492. <https://doi.org/10.3390/s130505478>
- Uchino, K. (2018). Piezoelectric Energy Harvesting Systems—Essentials to Successful Developments. In *Energy Technology* (Vol. 6, Issue 5, pp. 829–848). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/ente.201700785>
- Valdez, L. A., & Casali, R. A. (2018). Ab-initio study of structural, elastic and electronic properties of core/shell nanowires. *Revista Materia*, 23(2). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0469>
- Venet Zambrano VENET, M., Antonio Henrique Alves Pereira PEREIRA, M., & Piezoeléctricas, S. (n.d.). *ATCP del Brasil*.
- Vullers, R. J. M., van Schaijk, R., Doms, I., van Hoof, C., & Mertens, R. (2009). Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics*, 53(7), 684–693. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.12.011>
- Wang, J., Xiao, F., & Zhao, H. (2021). Thermoelectric, piezoelectric and photovoltaic harvesting technologies for pavement engineering. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 151). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111522>
- Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242–246. <https://doi.org/10.1126/science.1124005>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Wei, C., & Jing, X. (2017). A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 74, pp. 1–18). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073>

Xiong, H. (2014). *Piezoelectric Energy Harvesting for Public Roadways*.

Yang, H., Wang, L., Hou, Y., Guo, M., Ye, Z., Tong, X., & Wang, D. (2017). Development in Stacked-Array-Type Piezoelectric Energy Harvester in Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002079](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002079)

Yang, J. (2006). *Analysis of piezoelectric devices*. World Scientific.

Zhu, D. (n.d.). *Vibration Energy Harvesting: Machinery Vibration, Human Movement and Flow Induced Vibration*. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)



## 9. ANEXOS

### A.1 Publicaciones

#### Novel Low Temperature sensor based on optimized Z-shaped beam actuator

*M. Tecpoyotl-Torres*

*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, IICBA-CIICAp-UAEM.*

[tecpoyotl@uaem.mx](mailto:tecpoyotl@uaem.mx)

*S. F. Rodríguez-Fuentes*

*Maestría en Sustentabilidad Energética, IICBA-CIICAp-UAEM*

[sahiril.rodriguez@uaem.edu.mx](mailto:sahiril.rodriguez@uaem.edu.mx)

*C.A Ferrara-Bello*

*Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, IICBA-CIICAp-UAEM*

[carlos.ferarabl@uaem.edu.mx](mailto:carlos.ferarabl@uaem.edu.mx)

*D.M. Martínez-Rodríguez, P. Vargas-Chable*

*Faculta de Ciencias Químicas e Ingeniería, FCQeI-UAEM*

[dalia.martinez@uaem.edu.mx](mailto:dalia.martinez@uaem.edu.mx) , [vargas@uaem.mx](mailto:vargas@uaem.mx)

#### Abstract

*This work focuses on the performance of a modified Z-Shaped chevron actuator, thermally actuated, based on an arrangement of 8 pairs of beams anchored at their outer ends. The numerical analysis was performed using ANSYS™ Workbench software to obtain displacement and compare it with results of the experimental and theoretical analysis. Using a maximum temperature of 65° C, the displacement in the shaft, experimentally obtained, corresponds to 2.53 mm, while in the theoretical model the displacement value is 2.54 mm, that means an error of 0.65%. An amplification factor of approximately 59.2 is obtained. In the numerical model, the increase in each beam's length is of 0.067 mm applying the same temperature, while the displacement value of the shaft is 3.97 mm.*

**Keywords:** Thermal sensor, Pseudo Rigid Body Model, Amplification factor, Ansys.

micrometers) improving the results of most current surgical techniques [2]. Other actuators have been developed for support medical applications.

The thermal sensor MEMS D6T is an infrared temperature sensor from OMRON® that works without direct contact used for human detection, as well as abnormal temperatures in a process, such as in a refrigerator [3]. A MEMS sensor is reported in [4], which develops a monolithically integrated polyimide temperature and humidity sensor with a wide temperature range and response sensitivity. A structural arrangement to perform temperature sensing, is described in [5], it is a temperature sensor composed of a double-ended resonator with the coupling of a structural voltage amplifier, which operates by variation of the thermal expansion coefficient from -20 °C up to 60 °C. In [6] a chevron microactuator with a cascade type arrangement is presented to sense ambient temperature changes, the electrical signals are obtained by changing the capacitance of an interdigitated



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



**micromachines**  
an Open Access Journal by MDPI

Indexed in PubMed | Indexed in El Compendex | ISI/SCOPUS 4.5 | IMPACT FACTOR 3.523

## CERTIFICATE OF PUBLICATION

Certificate of publication for the article titled:  
Additive Manufactured Piezoelectric-Driven Miniature Gripper

Authored by:  
C. Andres Ferrara-Bello; Margarita Tecpoyotl-Torres; S. Fernanda Rodriguez-Fuentes

Published in:  
*Micromachines* **2023**, Volume 14, Issue 4, 727

**MDPI** Academic Open Access Publishing since 1996  
Basel, May 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



## A.2 Reconocimientos



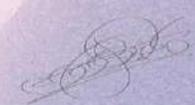
**R E C O N O C I M I E N T O**  
**"SOY MUJER Y HAGO CIENCIA"**

El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos  
 otorga el presente reconocimiento a:

**FERNANDA SAHIRIL RODRÍGUEZ FUENTES**

Por su participación en el evento "Soy mujer y hago ciencia"  
 llevado a cabo en el mes de febrero del 2022

  
 JOSÉ FRANCISCO PULIDO MACÍAS  
 Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología  
 del Estado de Morelos

  
 ADRIÁN MARGARITO MEDINA CANIZAL  
 Director del Centro Morelense de Comunicación  
 de la Ciencia

  
 MORELOS  
2018 - 2024

SECRETARÍA DE  
 DESARROLLO ECONÓMICO  
 Y DEL TRABAJO

CCyTEM  
 CONSEJO DE CIENCIA  
 Y TECNOLOGÍA DEL  
 ESTADO DE MORELOS

MUSEO  
 DE CIENCIAS  
 DE MORELOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EMILIANO ZAPATA DEL ESTADO DE MORELOS

## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EMILIANO ZAPATA DEL ESTADO DE MORELOS

La Secretaría Académica, la Secretaría de Investigación, a través de los Cuerpos Académicos "UAEM-Optimización y Software" y "UTEZ-Desarrollo de Software"

OTORGA EL PRESENTE

### RECONOCIMIENTO

a: **Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes**

*POR SU PARTICIPACIÓN CON LA PONENCIA*  
**"Diseño de un novedoso cosechador de energía de bajo costo utilizando actuación piezoeléctrica".**

En el marco del Decimoquinto Congreso Internacional de Cómputo en Optimización y Software

**Cuernavaca, Morelos del 4 al 6 de Octubre de 2023**

Por una humanidad culta

  
Dra. Jesús del Carmen Peralta Abarca  
Presidenta del Congreso

  
Dr. Marco Antonio Cruz Chávez  
Presidente del Comité Técnico



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

### A3. Estancia



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CIDESI<sup>®</sup>

Dirección Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
13 de Mayo de 2022

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Presente

**Asunto:** Carta Invitación

Estimada Dra. Tecpoyotl Torres:

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Por este medio, informo atentamente a Usted que los siguientes estudiantes, colaboradores del del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes
- MICA. Carlos Andrés Ferrara Bello
- Lic. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes

Llevaron a cabo satisfactoriamente una breve estancia en nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro, del 18 de abril al 13 de mayo de 2022. Durante este periodo realizaron las siguientes actividades:

- Recibieron asesoría y entrenamiento sobre las metodologías de fabricación que se llevan a cabo en CIDESI.
- Revisión de diseños para fabricación de máscaras
- Realización masters para los procesos de microfabricación en las instalaciones de este Centro.
- Pruebas preliminares de fabricación

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías.

c.c.p. Archivo

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 www.cidesi.com





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

## A4. Talleres

SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO Y DEL TRABAJO  
 CCyTEM CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS  
 MUSEO DE CIENCIAS DE MORELOS  
 MORELOS

# RECONOCIMIENTO

El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos, otorga el presente reconocimiento a:

## Lic. Sahiril Fernanda Rodriguez Fuentes

Por haber impartido el taller "Dispositivos Microelectromecánicos (MEMS) y Dispositivos en meso Escala" en la "Jornada Estatal del Conocimiento" llevada a cabo el 27 de octubre de 2022.

**ANDREA ANGÉLICA RAMÍREZ PAULÍN**  
 Directora del Centro de Morelense de Innovación y Transferencia Tecnológica y encargada de despacho de la Dirección General del CCyTEM

**ADRIÁN MARGARITO MEDINA CANIZAL**  
 Director del Centro Morelense de Comunicación de la Ciencia



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



MORELOS 2018 - 2024

SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO Y DEL TRABAJO

CCyTEM CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS

MUSEO DE CIENCIAS DE MORELOS

MORELOS INSTITUCIÓN DEL MUNDO

# RECONOCIMIENTO

El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos, otorga el presente reconocimiento a:

## Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes

Por haber participado el taller "Dispositivos electrónicos y electromecánicos aplicados en la detección, generación y cosecha miento de energía" en el "Día Internacional de la mujer y la niña en la ciencia" llevada a cabo el 10 de Febrero de 2023.

*Andrea Angélica Ramírez Paulín*  
ANDREA ANGÉLICA RAMÍREZ PAULÍN  
Directora General del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos

*Adrián Margarito Medina Canizal*  
ADRIÁN MARGARITO MEDINA CANIZAL  
Director del Centro Morelense de Comunicación de la Ciencia



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

# INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Maestría en Sustentabilidad Energética.



Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, a 08 de abril de 2024.



**MTA. MARGARITA FIGUEROA BUSTOS**  
**SECRETARIA EJECUTIVA**  
**DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: “DISEÑO DE UN COSECHADOR DE ENERGIA UTILIZANDO SENSADO PIEZOELECTRICO”, que presenta la alumna **SAHIRIL FERNANDA RODRIGUEZ FUENTES**, para obtener el título de la **MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**:

Atentamente

*Por una humanidad culta*

NOMBRE
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE

**PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)**

**NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.**

MFB\*MLGE/nmc.



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65.  
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / mse\_ciicap@uaem.mx

**UAEM**  
RECTORÍA  
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2024-04-09 11:11:23 | Firmante**

VoqnHd3LOW8CJbE3aPO2aSlf3RswQe0jhdAKKyepWCZan9O7dXxGAEmLOVZc33BXDr2Sr0r65mGYQ9128CZWABtosf58Q+W946f3kzPumBua8Z/CfAkJp0kFP/dUXvnt2pnHkF4qSPb0Cak/Abu95HZW/PkEimj9QI5laEZ3hwV1Uj7ikgqPMjHm2wchWnkomU2enf8ZJ2GdoNOLsmjDhMnJEZtUJ1IheMYqU8hMsFBZypz9/8K9I0t3a/vbXtSndyFeWJLSg8kefLjIYKSGXNtDNSuK69wmfu4QI34db7DJhGSzgwixSEuYnqa886Kz7NSu5/8rfxVBYOICNMoJNw==

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2024-04-09 13:19:05 | Firmante**

n4PpCg7aujZWRCKyeTXsqy5BvfHsNilY9B5uCCQUqh2nZWpmiTYolf2Rfak91BuR8b9y6rUJ/h0tH90QhWOUyQgYOlnNjc1ZVItK3Y+NZ1VnPHQMIcwrRtDqEq6zKG3m4GtBFu9F5xElzss26ksjtdaj33flW9mxiHdfznBCNNEjXQfdsPZWWVa1uB6cZ/w+pW/Bk2PptnZxToBk+GijMGyUmUvdJVtNkAnySnrRqcnPsOYJ9CdpU4WEvyNg1myUW4ktGUdJ1NHYNd+0DRK1q/H4IMGo4bhwQ5qYkuCBjYDxvNAYJSJ3kf/lcpJutpv03gwtr5oatcscPOSA==

**DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2024-04-09 14:10:22 | Firmante**

F6aEppOvGvXxH8TCIwfmikhqpmfIM43jOSIJYVt5uaGQKMWRBfZLW/NuqV2IH42wUj7SrxBKwD0GHRcdT5sV15IEWRxttKWtBUbRk22wy3fVEzJapEB2MbiUQB1wPBg9rO6tR+KXXMBd5zGeKZGnZxy5xtQ4rZ/K9bPkF8NNjFA9vAxMQwKQqc8kQalmWIL1mc/qYZxPyqe8Cs778x9CSfD03X4MWZLVhuJE+HHpW/YPu/tFPvFyZjP4BPZUERqcFMiUX/jdgYxgxuENm3U+/80aNcLbQ/wml+ZPp8d0CkcrVDAflqP5VvhyDdf5SRKtOhZWYwv2RqoSpWZY0Q==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2024-04-09 15:58:19 | Firmante**

hlDg8uhzwP5BailaTt51b1/2DatlhgzH+0jQwU9laTctaKGRHMoUZ9g//XZySX9uG3pTZqaS65oyOktHSVO1/igFLuXtrVB589aF1RRiRsYvBRomLXdA58M1vmmpxP6EjGE/+7b2mXZV4Dy8cWxb+wOhpPceFe9fpg8tlq/cZDxqxrURUt3soi0ZKiEnT3SWZBOhKmeWRwI58FD0KPK+GbC1Es9oTiJjpxLxRHU2b+6Xfr5ewGZ6RYdWnozMYUqzq3uAsrmXJU8DStxuXlhEenK09MpzcrYh8jdCdxlguL+kuoKWdFLXO9W+TpkrfwefC0ztyaccr8rH6yQyvTIEeckg==

**MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2024-04-10 23:01:46 | Firmante**

M8b78Band0z1hXSnFqCnX7s1k1AoLIh8OZFMfmki9S4CAiyatIRdhJbhgyTH0IAZSpml5IXnjQlc4qYQyrlBdDYRF5Y0/cc4yIl6aYXlx8es/M1LC2qqJzau3uMfpW+jdXFSP1D+ImL8z+sIrh4u0GKEDGdjxjmgpHIEU51ZZaMcwZs2FiksqAxzfdOOfRXQ9UrhY47SxNhYtmPX9H1DUUsG3dOXwpXvy8tFxorfrgcU2R0HTv1tpWdovYovbshqTiX7Qu+ovMraDcd7vAKZ7Smk+B1FmYJvYQf03zjsxQW9UmeLb7tPmxz8GwgBoY8QN7Q7Gu6PQoLdK2FVeYjJQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[dScbmwJzl](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/gwkB8AnEk9Dc6YxHXX8ECvn1eDfXbZIF>



UAEM  
RECTORÍA  
2023-2029