



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Boca del Río  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

"MICRODISPOSITIVO PIEZOELECTRICO, BASADO EN ÓXIDO  
DE ZINC, PARA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA AMBIENTAL POR  
VIBRACIONES MECÁNICAS"

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

VICTOR AUGUSTO JARVIO CORDOVA

DIRECTOR DE TESIS

DR. ARTURO GARCIA SALDAÑA



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290  
Tel. (229) 690 5010 correo: dir01\_bdelrio@tecnm.mx  
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Boca del Río, Ver **25/ mayo/ 2020**

ASUNTO: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

**VICTOR AUGUSTO JARVIO CORDOVA  
PASANTE DEL PROGRAMA MAETSRÍA EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
PRESENTE**

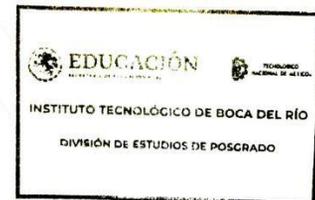
De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

**"MICRODISPOSITIVO PIEZOELECTRICO, BASADO EN ÓXIDO  
DE ZINC, PARA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA AMBIENTAL POR VIBRACIONES MECÁNICAS"**

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

**A T E N T A M E N T E**  
*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*Por nuestros mares responderemos*

**M. C. ANA LETICIA PLATAS PINOS  
JEFA DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACION**



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB  
c.c.p. Expediente





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

**Número Registro: A-0716-130818**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 12:00 horas del día 4 del mes de mayo de 2020 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

**"MICRODISPOSITIVO PIEZOELECTRICO, BASADO EN ÓXIDO DE ZINC, PARA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA AMBIENTAL POR VIBRACIONES MECÁNICAS"**

Que presenta el (la) alumno(a):

**VICTOR AUGUSTO JARVIO CORDOVA**  
Aspirante al Grado de:

**Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental**

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

**LA COMISIÓN REVISORA:**

**DR. ARTURO GARCÍA SALDAÑA**  
DIRECTOR

**DR. AGUSTIN LEOBARDO HERRERA MAY**  
CO-DIRECTOR

**Dra. MARIA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHAVEZ**  
Asesor

**M.C. IRMA ANGÉLICA GARCÍA GONZÁLEZ**  
ASESOR



## Resumen

Mediante la simulación, aplicando análisis de elementos finitos, se identificó un diseño trapezoidal, simulando un sistema de viga en cantiléver que soporta las condiciones de aceleración, frecuencia y amplitud de las vibraciones que se generan en un neumático automotriz. Como resultado, se obtuvo el diseño de un microdispositivo piezoeléctrico capaz de alimentar sensores de presión de ruedas automotrices.

Se diseñó un microgenerador utilizando como material piezoeléctrico óxido de zinc para generar energía eléctrica. Para ello se utilizó un sustrato de acero AISI 302 y un electrodo de plata, el cual permitió extraer la energía producida por dichas vibraciones, obteniéndose una potencia de generación de  $13 \mu\text{W}$  con una resistencia de carga óptima calculada de  $85.91 \text{ k}\Omega$ . El diseño de la estructura se optimizó, en cuanto a dimensiones y geometría, para funcionar fuera de resonancia.

El diseño garantizó un esfuerzo máximo de flexión de  $200 \text{ MPa}$  en la capa de óxido de zinc, por lo que la posibilidad de fractura en la estructura es baja. Lo anterior se debe a la frecuencia de resonancia de la estructura:  $1.0779 \text{ kHz}$ .

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue diseñar un microdispositivo piezoeléctrico basado en óxido de zinc, sugiriendo trabajar en un arreglo de 5 estructuras interconectadas en paralelo, dentro de un encapsulado, con lo que se logró generar una potencia de  $65 \mu\text{W}$  en condiciones de aceleración de  $1000 \text{ m/s}^2$  a  $1000 \text{ Hz}$ .

De acuerdo a los análisis estadísticos realizados al conjunto de datos arrojados por la simulación por computadora, se obtuvo que el microdispositivo diseñado, entregó sus valores óptimos de potencia a partir de  $700 \text{ m/s}^2$ .

Por otra parte, el comportamiento medio del microdispositivo se puede estimar de acuerdo a su ecuación característica:  $Y = -0.09 + 3.49 \text{ E}^{-4} X$

## Abstract

This work could demonstrate that is possible the use of piezoelectric microdevices to energize TPMS sensors. Applying finite element sensors, it has found an effective design which could support conditions of acceleration, frequency and amplitude of mechanical vibrations that are generated on an automotive tire.

An automotive tire is under acceleration conditions around 100 to 1000 m/s<sup>2</sup> with frequencies ranging from 1 to 1KHz. Considering those conditions, a trapezoidal structure was developed, based on a piezoelectric microdevice. Using Zinc Oxide as piezoelectric material to generate electrical energy, deposited on an AISI 302 stainless Steel substrate and a silver electrode it was possible to harvest energy in order of 13  $\mu$ W with an optimal calculated resistance of 85.91 K $\Omega$ .

The design of the structure was optimized in terms of dimensions and geometry, in order to work out of resonance and in the more severe conditions which it will be subjected inside the tire, it is warranted that with a maximum flexion effort of 200 MPa there will be no fracture in the structure since it has a resonance frequency of 1077.9 Hz; on a tire that condition doesn't occurs on normal conditions.

Therefore, taking advantage of the dimensions of each microdevice, we suggest to connect 5 structures interconnected on a parallel array inside an encapsulation, in order to generate 65  $\mu$ W of power, capable of feeding a tire pressure sensor.

According to the statistical analysis made on this work to the data set produced by the computer simulation, we obtained the optimal power values of the microdevice from 700 m/s<sup>2</sup>.

On the other side, the average behavior of the microdevice could be calculated by the equation:

$$Y = -0.09 + 3.49 E^{-4} X$$

La Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Boca del Río está incluida en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACyT con la referencia 005071.

*“La energía que se obtiene a través de la destrucción de los elementos naturales es un crimen contra la naturaleza y causa una catástrofe”*

- *Nikola Tesla*

## **AGRADECIMIENTOS**

A CONACYT por el apoyo con la beca de manutención durante mis estudios en mi maestría en ciencias en ingeniería ambiental dentro del Instituto Tecnológico de Boca del río.

A mi comité académico por el apoyo en el desarrollo de la investigación y redacción de tesis.

Al Instituto Tecnológico de Boca del Río por mi formación durante la maestría y el apoyo con el uso de sus instalaciones.

A la Dra. María del Refugio Castañeda Chávez por su apoyo económico para realizar mi estancia en Saltillo y en su aporte técnico para el desarrollo de la presente tesis.

A la Dra. Fabiola Lango Reynoso que siempre nos brindó atención de calidad en cuanto a trámites y movimientos dentro del instituto.

A la Lic. Beatriz Lango Reynoso también por sus atenciones y apoyo brindado para realizar reportes de fin de semestres y trámites importantes.

A mi novia Elizabeth González González por estar siempre presente sin importar la hora o el lugar y motivarme a ser siempre una mejor persona y enseñarme a tener una mejor apreciación de la naturaleza y la vida.

A mi amigo Ernesto Alberto Elvira Hernández por las enseñanzas y su aportación en ideas para la solución de problemas, por su enseñanza en utilizar software de simulación, además del apoyo durante nuestra estancia en el centro de investigación en química aplicada.

Al Dr. Agustín Leobardo Herrera May por su motivación, siempre impulsando a sus estudiantes a mejorar, estar a la vanguardia y ser personas de calidad y por permitirme contactar con CIQA para poder realizar mi estancia.

Al Dr. Arxel De León Santillán, por sus atenciones, enseñanzas y recibimiento en mi estancia en el Centro de Investigación en Química Aplicada

Al Dr. Arturo García Saldaña por sus enseñanzas y aporte en el enriquecimiento científico de la presente tesis

A mis padres y hermanos y amigos por siempre estar presentes y apoyarme durante mi desarrollo como persona y estudiante.

# INDICE

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico y conceptual .....	3
2.1 Energía.....	3
2.2 Energy harvesting.....	4
2.2.1 Recolección de energía basada en vibraciones mecánicas.....	5
2.2.2 Energy harvesting en la industria automotriz “sensores TPMS” .....	5
2.2.3 Vibraciones mecánicas disponibles en neumáticos para microdispositivos piezoeléctricos.....	8
2.3 Microgeneradores.....	8
2.3.1 Piezoelectricidad.....	9
2.3.2 Materiales piezoeléctricos.....	10
2.4 Microgeneradores.....	11
2.4.1 Microgeneradores electrostáticos.....	12
2.4.2 Microgeneradores electromagnéticos .....	13
2.4.3 Microgeneradores piezoeléctricos .....	13
3. Marco Referencial.....	14
3.1 Antecedentes .....	14
4. Problema de investigación .....	20
4.1 Situación problemática .....	20
4.1.1 Efectos de los componentes de las baterías .....	22
4.2 Delimitación del problema.....	23
4.3 Planteamiento del problema .....	23
4.4 Pregunta de investigación.....	24
5. Justificación.....	24
6. Hipótesis .....	24
7. Objetivos.....	25
7.1 Objetivo General .....	25
7.2 Objetivos particulares.....	25
8. Materiales y métodos.....	25
8.1 Búsqueda de información .....	26

8.2 Diseño de la geometría del microgenerador piezoeléctrico mediante software CAD .....	26
8.3 Modelado de elementos finitos.....	28
8.3.1 Análisis modal.....	28
8.3.2 Análisis de sensibilidad de malla.....	32
8.3.3 Análisis estático estructural.....	33
8.3.4 Análisis de respuesta armónica .....	35
8.4 Cálculo de la resistencia de carga óptima .....	44
9. Resultados .....	45
9.1 Resultados de Fase 4 análisis estadístico de datos.....	48
9.1.1 Prueba de Kruskal-Wallis.....	51
9.1.2 Prueba de POST-HOC.....	53
10. Discusión.....	55
11. Conclusiones.....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Daños que pueden generar los químicos de las baterías desechadas.....	2
Figura 2. (A) Ilustración de un microgenerador piezoeléctrico utilizando un sistema linear masa – cantiléver.....	5
Figura 3 Esquemático de un módulo TPMS .....	7
Figura 4. Efectos piezoeléctricos directo e inverso. Adaptado .....	9
Figura 5. Estructura cristalina del PZT antes y después de ser polarizado .....	11
Figura 6. Esquemático donde se muestra un microgenerador con principio de transducción electrostático.....	12
Figura 7. Esquemático donde se muestra un microgenerador con principio de transducción electromagnético.....	13
Figura 8. Esquemático donde se muestra un microgenerador en arreglo de viga en cantiléver .	14
Figura 9. Esquemático de un generador de energía eléctrica basado en vibraciones mecánicas reportado por Dai, 2009.....	16
Figura 10. a) Microgenerador convencional utilizando viga en cantiléver con una masa sísmica fija en su extremo b) Microgenerador con sistema de captación de vibraciones por impacto con dos vigas separadas .....	17
Figura 11. Esquemático de un microgenerador piezoeléctrico MEMS en modo d33 . .....	18
Figura 12. Imágenes de SEM del microdispositivo presentado por SONG a) Dos vueltas del espiral visto de frente, b) vista aumentada del borde grabado, c) Vista frontal del espiral de 4 vueltas, d) vista trasera del espiral, e) Sección transversal del generador, f) Simulación del estrés distribuido en la sección de anclaje y g) Unión redondeada al final del espiral del microgenerador .....	19
Figura 13. Diagrama de flujo donde se muestran las actividades realizadas en este proyecto de investigación.....	25
Figura 14. Esquemático donde se muestran las dimensiones del sustrato del microgenerador.	28
Figura 15. Resultado del análisis modal donde se muestra que el microgenerador presenta movimiento fuera del plano con frecuencia de resonancia de 1.0779 kHz .....	30
Figura 16. Primeros 4 modos de vibración 1) primero 1077.9 Hz 2) segundo 2837.3 Hz.....	31
Figura 17. Primeros 4 modos de vibración 3) tercero 7426 Hz 4) cuarto 11389 Hz.....	31
Figura 18. Vista de la distribución de la malla utilizada para el análisis.....	32
Figura 19. Gráfico del análisis de sensibilidad de malla.....	33
Figura 20. Desplazamiento estático obtenido del análisis estático estructura. ....	34

Figura 21. Desplazamiento estático.....	34
Figura 22. Esfuerzo de flexión debido al peso de la estructura.....	35
Figura 23. Temperatura de un neumático en funcionamiento .....	38
Figura 24. Incremento de la presión por la temperatura de un neumático.....	40
Figura 25. Densidad vs Temperatura en un neumático .....	42
Figura 26. Viscosidad cinemática en el aire con respecto a los cambios en la temperatura .....	43
Figura 27. Esquemático donde se muestra la forma en que se debe conectar la resistencia de carga entre los electrodos del microgenerador. ....	44
Figura 28. Gráfico de voltaje vs frecuencia de un microgenerador piezoeléctrico basado en óxido de zinc. ....	46
Figura 29. Encapsulado de una serie de microdispositivos piezoeléctricos.....	47
Figura 30. Vista lateral del encapsulado de una serie de microdispositivos. ....	47
Figura 31. Regresión lineal de los datos de aceleración media. ....	48
Figura 32. Resultado de grupos de datos con y sin diferencias significativas según análisis estadístico.....	53
Figura 33 Diagrama de caja y bigote de voltaje vs aceleración .....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fuentes de energía disponibles para generar electricidad .....	4
Tabla 2 Características de sensores de circuito integrado para módulos TPMS. ....	7
Tabla 3 Tipos de materiales piezoeléctricos y ejemplos de aplicación .....	15
Tabla 4 Clasificación y uso de las pilas y baterías primarias .....	21
Tabla 5 Clasificación y uso de las pilas y baterías secundarias.....	22
Tabla 6 Efecto de algunos de los componentes presentes en las baterías .....	22
Tabla 7 Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en los modelos numéricos .....	29
Tabla 8 Matrices piezoeléctricas de la película de ZnO utilizadas en los modelos numéricos del microgenerador .....	29
Tabla 9 Incremento de presión vs temperatura.....	39
Tabla 10 Variación de la densidad respecto a la temperatura y presión .....	41
Tabla 11 Variación de la viscosidad con respecto a la temperatura del aire contenido en un neumático.....	43
Tabla 12 Características del diseño propuesto .....	45
Tabla 13 Ecuaciones obtenidas aplicando regresión lineal a los diferentes conjuntos de datos	49
Tabla 14 Prueba Kolmogorov Smirnov calculada en SPSS.....	50
Tabla 15 Prueba de homogeneidad de varianzas calculada en SPSS.....	51
Tabla 16 Calculo de ANOVA mediante SPSS.....	52
Tabla 17 Prueba de Tukey.....	54
Tabla 18 Estadísticas descriptiva .....	55

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Calculo del factor de amortiguamiento.....	36
Ecuación 2. Calculo del amortiguamiento debido al aire .....	36
Ecuación 3. Factor Beta para el cálculo del amortiguamiento.....	36
Ecuación 4. Cálculo del factor R debido a las dimensiones.....	37
Ecuación 5. Ecuación de estado de los gases ideales .....	38
Ecuación 6. Cálculo de la densidad del aire .....	40
Ecuación 7. Cálculo de la viscosidad dinámica del aire .....	42
Ecuación 8. Ecuación de resistencia de carga óptima.....	44
Ecuación 9. Cálculo de la capacitancia de la película de ZnO.....	45
Ecuación 10. Cálculo de la potencia del microdispositivo.....	46

## 1. Introducción

El internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), es una evolución tecnológica que trata de la implementación de billones de dispositivos alrededor del mundo. Los dispositivos que forman parte del IoT tienen la capacidad de recolectar y compartir información como por ejemplo sensores, celulares, relojes, entre otros, los cuales generarán una amplia demanda de elementos electrónicos inalámbricos que requerirán energizarse. La tecnología disponible actual para alimentar dichos dispositivos es el uso de pilas y baterías.

Las pilas y baterías, son elementos portátiles que pueden sostener una cantidad de carga limitada para mantener alimentado un dispositivo. El problema con ellas es que, en caso de ser desechable, dan una vida limitada convirtiéndose en residuo peligroso; en caso de ser recargable aumenta su periodo de vida. Sin embargo, su tiempo de vida es limitado y en un intervalo de tiempo corto también se vuelve residuo peligroso para el ambiente.

Comparando la pila y batería; la pila es un aparato destinado al almacenamiento de energía eléctrica en forma de energía química. Cuando se agota el electrolito, la pila deja de suministrar energía y se convierte en residuo. La pila es de un solo uso. En el caso de la batería, tiene la ventaja de que si se energiza en sus electrodos puede volver a almacenar energía y cederla, aumentando la vida útil de la misma (Castells Xavier, 2012). Cabe mencionar que las pilas convencionales están fabricadas de materiales como mercurio, cadmio, plomo o litio que pueden dañar el medio ambiente. El daño que se genera si éstas se desechan directamente al ambiente provoca que, en el proceso de descomposición de la pila, los metales pesados de la misma entren en contacto con la tierra y mantos acuíferos. Si una batería se descompone en el ambiente, el mercurio contenido en ésta puede contaminar hasta 160 000 litros de agua (Salinas y Mena, 2017).

En la Figura 1 se muestra una infografía sobre una investigación desarrollado por la SEDEMA donde se observa la cantidad de residuos de pilas producidas en un año en la ciudad de México y los daños a la salud que provocan los residuos de los componentes de las mismas.

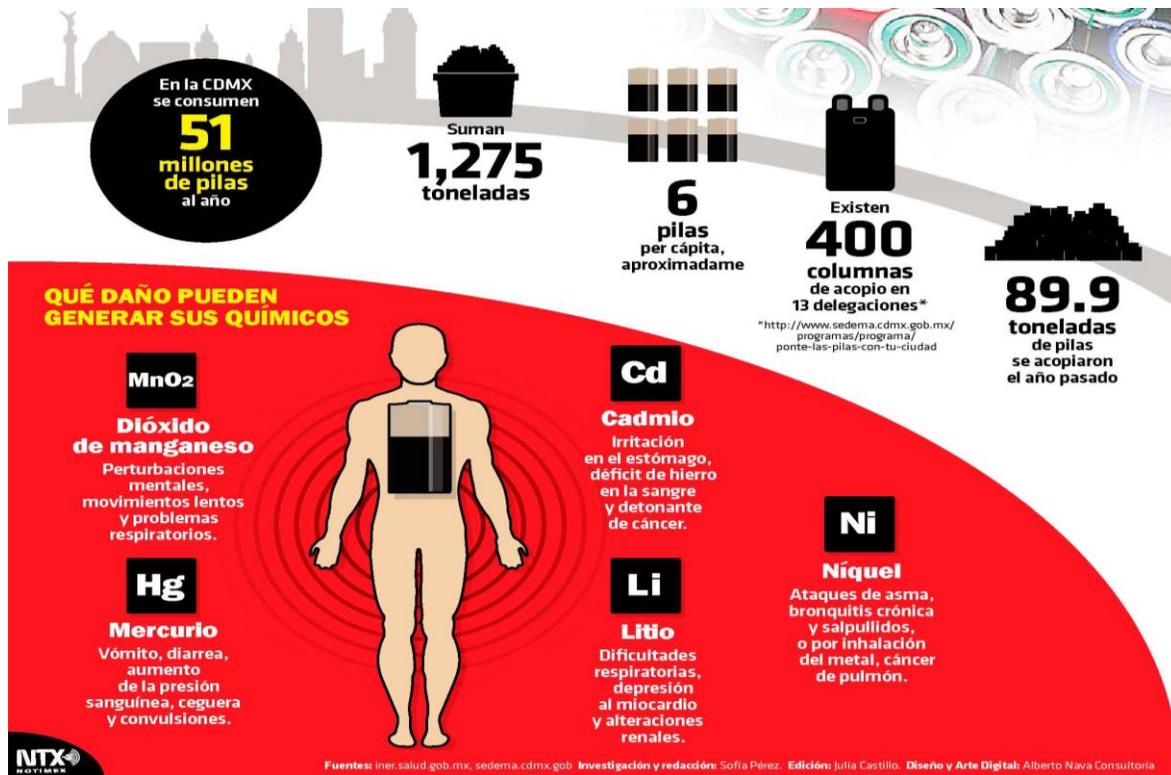


Figura 1. Daños que pueden generar los químicos de las baterías desechadas. (Ambiente, 2018).

En el presente proyecto que consiste en diseñar un microdispositivo piezoeléctrico basado en óxido de zinc para recolectar energía ambiental, se propuso la generación de energía eléctrica de manera limpia y sustentable, minimizando el impacto al ambiente por contaminación debido al uso de baterías y pilas. Centrándose en el diseño de dispositivos piezoeléctricos basados en vibraciones mecánicas provenientes de un neumático automotriz que cuente con sensor de presión de aire. El dispositivo diseñado tiene la tarea de absorber dichas vibraciones donde se sitúe el dispositivo. Con ello, se generará energía eléctrica, disponible para suministrar energía a los sensores de la rueda los cuales demandan una potencia del orden de los  $\mu\text{W}$ .

Por otra parte, las micro y nanotecnologías han permitido el desarrollo y fabricación de transductores de energía eléctrica. Utilizando los microgeneradores pueden fabricarse arreglos interconectados a dispositivos electrónicos como los capacitores para almacenar la energía producida y posteriormente suministrarla. Esta energía generada, se puede conectar directamente en el dispositivo que la requiera, siempre y cuando el dispositivo que se desea alimentar se encuentre en un entorno expuesto a vibración. El microgenerador suministrará energía sin interrupción. Con lo anterior, se podrá sustituir el uso de baterías y pilas por el microgeneradores. Para lograr lo anterior, se debe trabajar en diseños de dispositivos

piezoeléctricos para recolección de energía por medio de vibraciones mecánicas ambientales, con geometrías que permitan, generar potencia eléctrica suficiente para alimentar los dispositivos como sensores, indicadores LED (Light Emitting Diode), y pequeños aparatos electrónicos dependiendo de la frecuencia y amplitud de las vibraciones donde se encuentren montados.

Por parte de la industria automotriz, cada vez se incorporan más dispositivos sensores que permiten la gestión de las condiciones de seguridad, manejo y confort de un automóvil, tal como los sensores de presión de aire dentro de los neumáticos de las ruedas, conocidos por sus siglas en inglés como sensores TPMS "*Tire Pressure Monitor System*".

La vida útil de un sensor TPMS, está limitada al tiempo de duración de la pila (Kandler *et al.*, 2019) con la cual vienen alimentados, el cual es de aproximadamente 5 a 10 años, cuando la pila se agota, el módulo entero se convierte en un desecho peligroso que podría llegar al ambiente y dañarlo por los componentes electrónicos que contiene.

Por otra parte la aplicación de los microdispositivos piezoeléctricos es una buena opción para lograr extender el tiempo de vida del sensor incluso hasta el punto de lograr hacerlos autónomos y libres de baterías (Wang *et al.*, 2013).

A su vez en la industria del automóvil existe una amplia gama de oportunidades para poder aplicar los microdispositivos piezoeléctricos. Sus aplicaciones se amplían a los diferentes sistemas de control y sistemas de presión en los neumáticos, gestión del motor, estabilidad seguridad de los pasajeros y control de emisiones contaminantes (Bhatt *et al.*, 2019) por lo que la propuesta de implementación es viable con el afán de extender la vida útil de los sensores que manejan pilas y tratar de hacerlos autónomos para minimizar la cantidad de desechos automotrices que lleguen al ambiente.

Dicho lo anterior, se sugiere utilizar óxido de zinc como material piezoeléctrico para transducir energía eléctrica en el orden de los  $\mu\text{W}$  a partir de las vibraciones mecánicas producidas por un neumático automotriz.

## **2. Marco teórico y conceptual**

### **2.1 Energía**

La energía es la capacidad potencial que tienen los cuerpos para producir trabajo o calor, o también se define como la capacidad de un sistema para realizar un trabajo (Doménech *et al.*, 2003). El ser humano siempre ha utilizado fuentes de energía para obtener calor o realizar

trabajos, primero utilizando su propia fuerza y después aprovechando la de origen animal, luego aprendieron a utilizar la energía del viento y el agua para finalmente utilizar los combustibles fósiles y la energía nuclear (Merino, 2007).

De las fuentes de energía antes mencionadas, en la industria y generación de energía eléctrica, se utiliza la energía de los combustibles fósiles, la disponibilidad de los recursos de los cuales se obtiene esta energía, es limitada, por lo que dichas fuentes se conocen como fuentes no renovables.

Así mismo, de entre todas las fuentes de energía disponibles, las renovables son aquellas que están disponibles de manera continua e inagotable, siempre y cuando se respeten los ciclos naturales. El sol, por ejemplo, es una de las fuentes renovables de energía; su calor provoca los vientos, origina el ciclo del agua y por lo tanto propicia la energía hidráulica (Merino, 2007).

## 2.2 Energy harvesting

El término *energy harvesting* se refiere al proceso mediante el cual un sistema o dispositivo recolecta energía del entorno y la convierte en electricidad. En la Tabla 1 se muestran algunas fuentes de energía disponibles en el entorno. Entre las fuentes más abundantes de energía disponibles en el entorno se encuentran las vibraciones mecánicas.

Tabla 1. Fuentes de energía disponibles para generar electricidad

Principales fuentes	Tipo de fuente
Entorno	Solar, viento, gradientes de presión y temperatura, ondas acústicas, sonido y flujo de agua
Cuerpo humano	Presión sanguínea, temperatura corporal, caminar, correr, brazo, pierna, movimiento de dedos y respiración
Vehículos	Automóviles, aeronaves, trenes, turbinas, llantas y barcos
Estructuras	Edificios, puentes y carreteras
Industria	Motores, generadores, compresores, ventiladores, bombas

Información obtenida de ( Agencia Internacional de la Energía, Revista National Geographic en su número especial del Cambio Climático (noviembre de 2015), 10 argumentos a favor de las energías renovables - Sostenibilidad para todos)

### 2.2.1 Recolección de energía basada en vibraciones mecánicas

Todo nuestro alrededor está en movimiento, por eso es que las vibraciones mecánicas son una de las fuentes de energía más prometedoras presentes en el entorno, las cuales podemos aprovechar para producir electricidad (Rodríguez, 2011).

A su vez, en un sistema simple de recolección de energía mecánica, se utilizan la configuración de vigas en voladizo, montadas en una estructura vibrante. La deformación provocada en la viga genera voltaje de corriente alterna en los electrodos que recubren la capa de material piezoeléctrico como se muestra en la Figura 2.

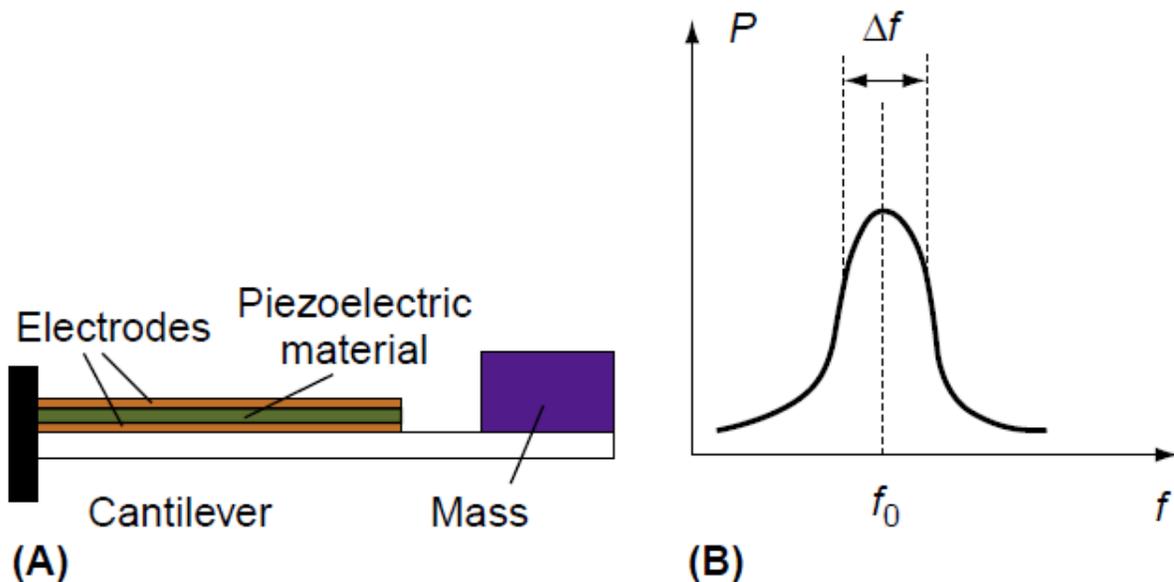


Figura 2. (A) Ilustración de un microgenerador piezoeléctrico utilizando un sistema lineal masa – cantiléver. (B) Respuesta de un sistema típico lineal de microgenerador piezoeléctrico con frecuencia de resonancia de  $f_0$  (Li et al., 2016).

### 2.2.2 Energy harvesting en la industria automotriz “sensores TPMS”

Durante el recorrido de un automóvil y debido a su funcionamiento, en él se desarrolla gran cantidad de vibraciones mecánicas. Estas pueden ser cosechadas y aprovechadas mediante la

instalación de microdispositivos piezoeléctricos. Una de las aplicaciones principales en las cuales se puede aprovechar estos principios es en la aplicación de sensores TPMS. Cada automóvil de gama alta y deportivos, tiene un sensor TPMS en cada una de sus ruedas, éstos tienen un sensor de presión alimentado por una pila y van montados dentro de los neumáticos.

La problemática que presentan los TPMS radica en que el tiempo de vida útil de sus baterías es limitado, dicho tiempo de vida oscila entre 5 a 10 años, por lo que entre estos intervalos de tiempo se requiere reemplazar continuamente los sensores lo que los convierte en un residuo peligroso debido a los contenidos de sus pilas (Liu *et al.*, 2018).

La Figura 3 muestra la instalación de un módulo TPMS en la válvula de inflado de un neumático automotriz. Usualmente un módulo TPMS consta de un sensor de presión, una interface de baja frecuencia, un módulo transmisor de radiofrecuencia, una antena y una batería primaria. El rango de consumo de energía del módulo depende del número de transmisiones por minuto que realiza y los intervalos de tiempo que el módulo se encuentra en modo de reposo, ya que el mismo cuenta con un acelerómetro que detecta cuando el vehículo está en movimiento, permitiendo entrar en modo reposo para ahorrar energía. La capacidad de las baterías comúnmente utilizadas oscila entre los 220 – 600 mAh (Yang *et al.*, 2018). En la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de los consumos de potencia de diferentes sensores de circuitos integrados disponibles en la industria automotriz.

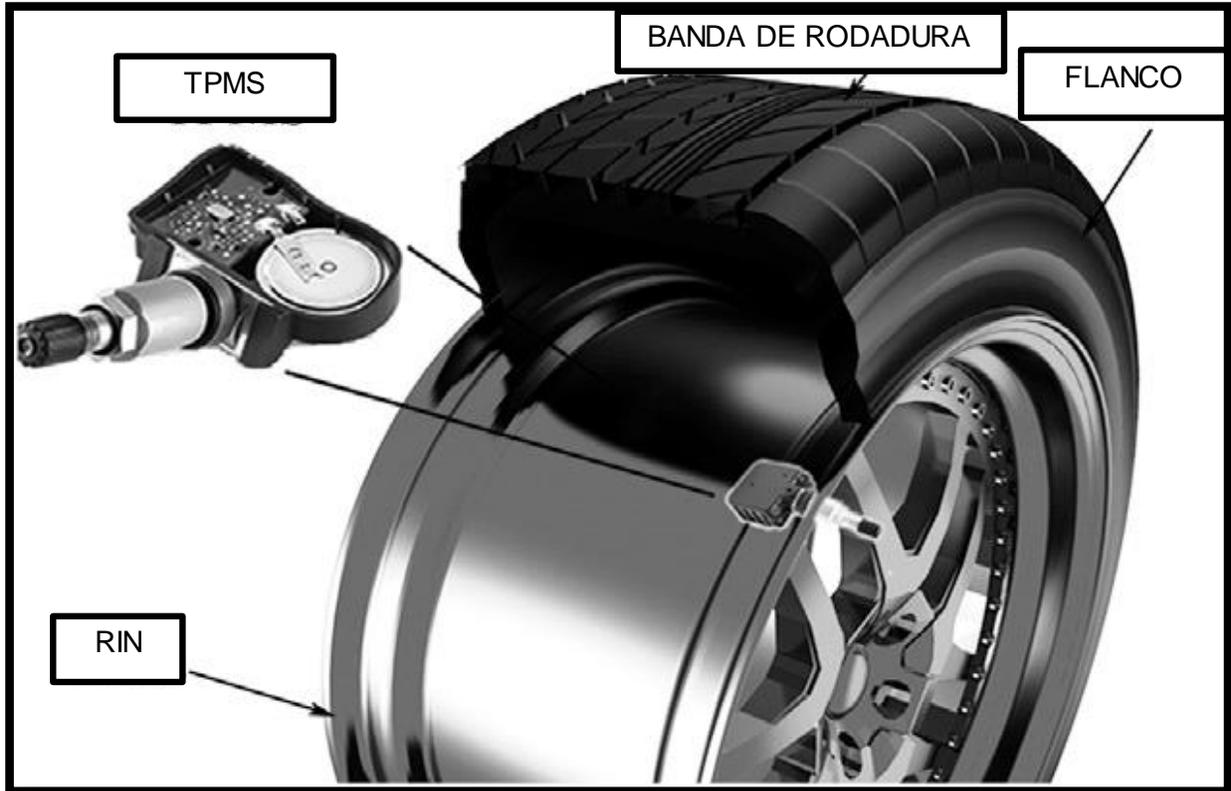


Figura 3. Esquemático de un módulo TPMS (Yang et al., 2018).

Tabla 2. Características de sensores de circuito integrado para módulos TPMS.

Compañía	Circuito integrado	Consumo de corriente típico en modo activo + transmisión por RF
Infineon	SP370	Modo activo: 2 mA RF: 10 mA Modo reposo: 0.7 uA
Freescale	FXTH870x	Modo activo: 2 mA RF: 6 mA Modo reposo: 0.5 uA
Texas instruments	TPIC82010	Modo activo: 1.53 mA RF: 10.5 mA Modo reposo: 0.1 uA
Melexis	MLX91801/2 MLX72013	+ Modo activo: 1 mA RF: 3.8 – 16 mA

### **2.2.3 Vibraciones mecánicas disponibles en neumáticos para microdispositivos piezoeléctricos**

En un neumático, existen diferentes fuentes de excitación. Pueden ser debido a la rotación, campo gravitacional, superficie de contacto con el suelo y la deformación del mismo neumático. Es posible situar un microdispositivo en el interior de la banda de rodadura, el rin o el flanco del neumático.

En cuanto a las condiciones de vibración en neumáticos se sabe que la tensión máxima que se puede obtener por la deformación del neumático debido al contacto con el suelo va desde 10 a 50 mm (Yang *et al.*, 2018).

Por lo que se refiere a la frecuencia de vibración, esta se encuentra en función de la velocidad de rotación. La deformación debido al contacto con el suelo provoca aceleración tangencial variando desde 0 a 1500 m/s<sup>2</sup> (Yang *et al.*, 2018). Se han reportado picos de aceleración radial de 100 m/s<sup>2</sup>. La aceleración depende de la velocidad de manejo (Behroozinia *et al.*, 2018). Se han registrado frecuencias de vibración de 100 Hz en promedio debido a la interacción entre el neumático y el pavimento. Para el diseño de microdispositivos debe considerarse que serán sometidos a aceleraciones extremadamente altas para garantizar su tiempo de vida y evitar su destrucción debido a desplazamientos excesivos.

### **2.3 Microgeneradores**

Recordando que cuando se habla de energy harvesting, se hace referencia a los sistemas encargados de la recuperación, reutilización y aprovechamiento de los diferentes tipos de energía que se encuentran en el ambiente y que usualmente se desperdician (Erturk, 2008). Estos sistemas realizan el proceso de transformación de energía tanto solar, térmica, vibraciones, en energía eléctrica (Kim *et al.*, 2016). El principal objetivo de esta tecnología es proveer una fuente de energía eléctrica remota y/o la recarga de dispositivos de almacenamiento, tales como los capacitores, produciendo un impacto ecológico importante debido a que ayudan a reducir los residuos químicos que se producen al utilizar los dispositivos de almacenamiento de energía convencionales, comúnmente llamados pilas.

### 2.3.1 Piezoelectricidad

El término piezoelectricidad se deriva del griego piezein que significa presionar (Dahiya y Valle, 2012). Este fenómeno fue descubierto en 1880 por los hermanos Curie. En sus experimentos notaron que algunos materiales cuarzo, turmalina, blenda, topacio generaban carga eléctrica cuando se deformaban mecánicamente “efecto piezoeléctrico directo” como en la Figura 4a Un año después de su descubrimiento, el físico Gabriel Lippman, demostró que, si se aplicaba una diferencia de potencial a estos materiales piezoeléctrico, se deformaban mecánicamente “efecto piezoeléctrico inverso” ilustrado en la figura 4b.

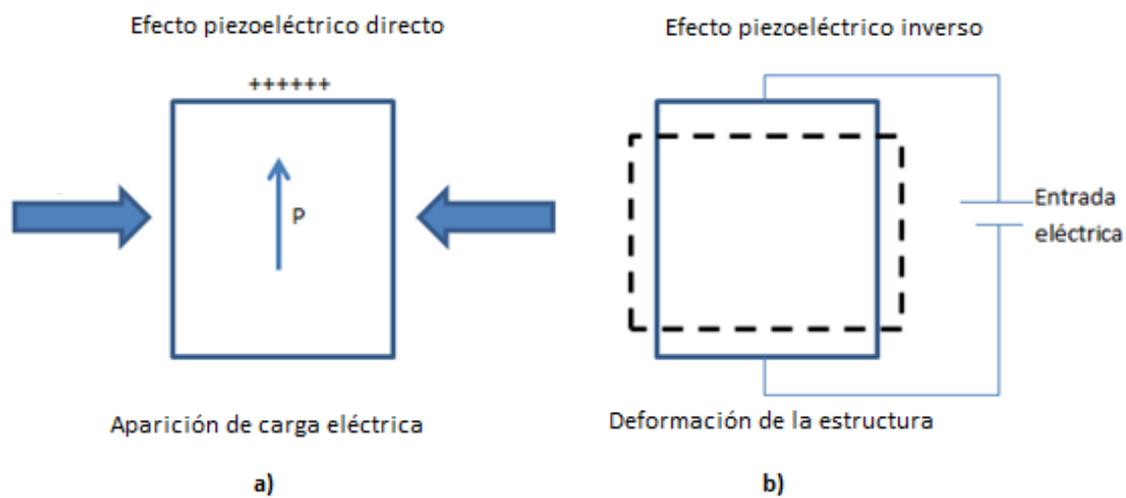


Figura 4. Efectos piezoeléctricos directo e inverso. Adaptado (Minazara et al., 2008).

En 1917 se comenzaron a usar materiales piezoeléctricos en aplicaciones de detección de objetos bajo el agua. A estos dispositivos se les llamo hidrófonos. Consistían de una placa de cuarzo entre láminas de acero, las cuales emitían y recibía ondas electromagnéticas en el orden de kHz. Después de la invención del hidrófono, se dio lugar a la invención de otros sistemas que aprovechaban el efecto piezoeléctrico. Tales como, micrófonos, audífonos, dispositivos de grabación de sonido, medida de vibraciones, fuerzas y aceleraciones (Sharapov, 2011). Posteriormente, en 1944 en el *Lebedev Physical Institute*, los científicos investigadores B. M. Wool e I. P. Goldman avanzaron en el desarrollo de materiales piezoeléctricos sintéticos, desarrollando así el primer método de sinterización de una cerámica piezoeléctrica de titanato de bario “BaTiO<sub>3</sub>”. Más tarde en Estados Unidos se continuó con el desarrollo de otra cerámica piezoeléctrica de titanato Zirconato de plomo conocida como PZT (Sharapov, 2011). Continuando

con la investigación en 1969 Kawai descubre un efecto piezoeléctrico potente en el polímero denominado polifluoruro de polivilideno "PVDF".

### **2.3.2 Materiales piezoeléctricos**

Como se mencionó anteriormente los materiales piezoeléctricos tienen la capacidad de polarizarse al deformarlos mecánicamente y viceversa; es decir que se deforman al aplicarles una carga eléctrica (Carbonari, 2003).

De acuerdo a los comportamientos definidos anteriormente los cuales pueden ser efecto directo e inverso, podemos tener sensores o actuadores. En el caso de los sensores se utiliza el efecto inverso mientras que para el caso de los actuadores se utiliza el efecto directo. (Minazara *et al.*, 2008).

Dichos comportamientos son característicos de los materiales ferroeléctricos, esta propiedad denominada ferroelectricidad nace de la analogía con el fenómeno ferromagnético. Es decir, tal como los materiales ferromagnéticos se muestra una magnetización espontánea y un efecto de histéresis en relación entre la magnetización y el campo magnético.

Por otra parte, Los cristales ferroeléctricos también presentan una polarización eléctrica espontánea y un efecto de histéresis entre el desplazamiento dieléctrico y el campo eléctrico. Este comportamiento se presenta principalmente a temperaturas inferiores a la temperatura de Curie<sup>1</sup>, ya que a temperaturas mayores el material pierde propiedades piezoeléctricas y presenta un comportamiento dieléctrico normal (Carbonari, 2003).

Las cerámicas piezoeléctricas están constituidas por mezclas policristalinas: titanato de bario, titanato de calcio, plomo o titanozirconatos de plomo, los cuales se obtienen por compresión de polvo a alta temperatura, siendo moldeadas y cocidas en un horno (Sugishita, 1998). En la Figura 5 se observa la estructura policristalina del titanato Zirconato de plomo.

Igualmente las cerámicas pueden ser producidas en forma de discos, bastones, paralelepípedos, tubos, sectores cilíndricos y semi esferas que luego pueden ser ensambladas como esferas (Sugishita, 1998).

---

<sup>1</sup> La temperatura de Curie en cristales piezoeléctricos  $T_c$ , es la temperatura a la cual ellos cambian de un estado polarizado a uno no polarizado, destruyendo el efecto ferroeléctrico debido a la agitación térmica. (Kittel C., 1995)

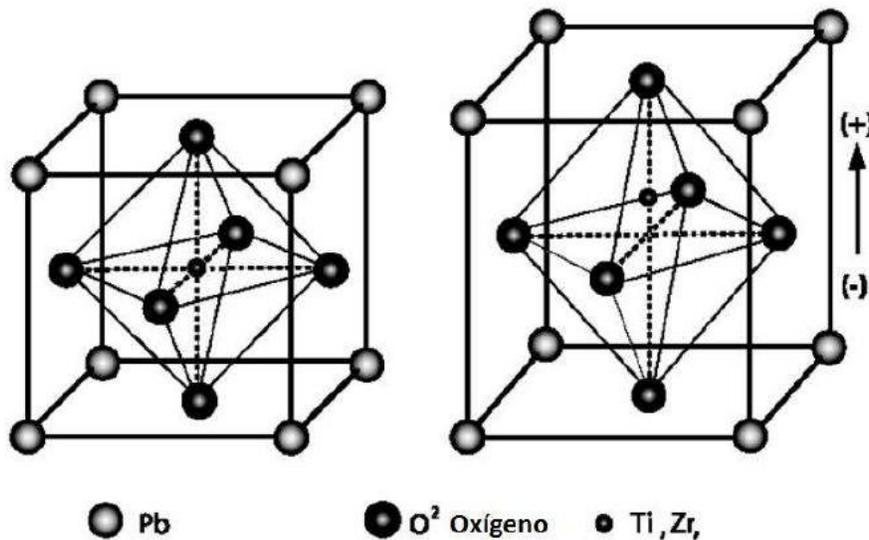


Figura 5. Estructura cristalina del PZT antes y después de ser polarizado (Sugishita, 1998).

Para preparar PZT se utiliza una mezcla de polvos muy finos de óxidos metálicos en proporciones específicas, posteriormente estos polvos son mezclados con un aglutinante orgánico y el resultado de dicha mezcla es dispuesta en formas específicas (discos, barras, placas, etc.), las cuales son sometidas a altas temperaturas durante un tiempo determinado. Como resultado del proceso, las partículas de polvo sinterizado y el material forman una estructura cristalina muy densa que posteriormente es enfriada y cortada, finalmente los electrodos son aplicados en las superficies adecuadas de la estructura (Moheimani y Fleming, 2006).

Aunado a esto con el desarrollo de la electrónica flexible, se han creado dispositivos cada vez más pequeños y eficientes que consumen cantidades de energía en el orden de mW o  $\mu$ W. Los microgeneradores de tecnología MEMS por sus siglas en inglés “*Sistemas Micro Electro Mecánicos*” pueden favorecer el desarrollo de fuentes de poder independientes para dispositivos electrónicos de bajos consumos energéticos como sensores inalámbricos, dispositivos portátiles e implantes médicos.

## 2.4 Microgeneradores

Se ha trabajado en propuestas para sustituir el uso de baterías en los microgeneradores de energía. Éstos son elementos que toman la energía de las vibraciones mecánicas presentes en el ambiente para convertirlas en energía eléctrica. Para lograrlo, los microgeneradores se basan

en tres diferentes principios de transducción: Electromagnetismo, electrostática y piezoelectricidad.

De los tipos de microgeneradores mencionados anteriormente, cada uno de ellos tiene ciertas características que les proporcionan ventajas y desventajas de uno con respecto a otros.

### 2.4.1 Microgeneradores electrostáticos

Los microgeneradores electrostáticos constan de dos placas paralelas como en la Figura 6 que cambian su capacitancia debido al aumento o disminución de la distancia entre ellas. Estas placas están cargadas eléctricamente y separadas por un dieléctrico (por ejemplo, aire). Así, las distancias entre las placas metálicas del microgenerador pueden modificarse mediante las vibraciones mecánicas del entorno, generando una variación de capacitancia. Las ventajas que tienen este tipo de microgeneradores son su buena integración con la tecnología MEMS y voltajes de salida de hasta 10 volts. Sin embargo, para funcionar correctamente las placas que forman este tipo de dispositivos deben estar correctamente alineadas.

Los microgeneradores electrostáticos tienen buena integración con la tecnología de sistemas microelectromecánicos, buen voltaje de salida de hasta 10 V y son bastante duraderos

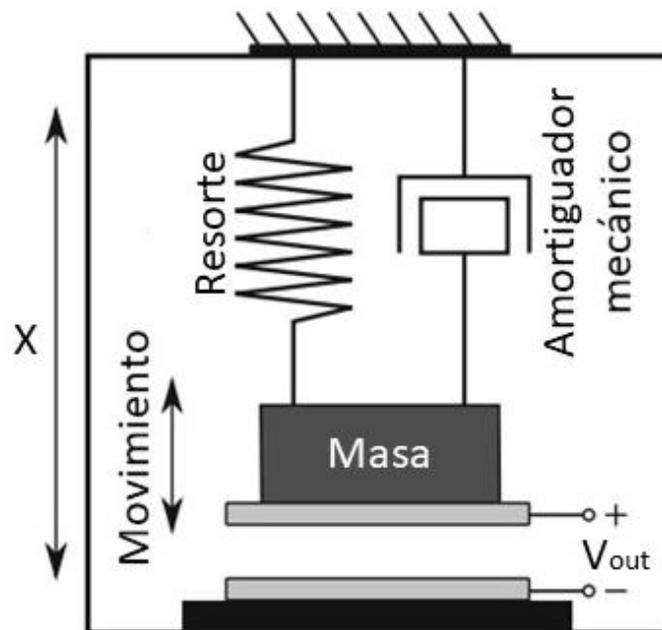


Figura 6. Esquemático donde se muestra un microgenerador con principio de transducción electrostático.

### 2.4.2 Microgeneradores electromagnéticos

Este tipo de microgenerador se basa en el principio de inducción de Faraday, en el cual un voltaje es generado a partir de la interacción de un campo magnético variable y una bobina conductora, ver Figura 7. Este tipo de microgeneradores funcionan bien a bajas frecuencias de vibración, no necesitan fuentes externas de voltaje para su operación, pero son ineficientes a escala MEMS y requieren grandes desplazamientos de sus masas sísmicas para alcanzar buena generación de energía.

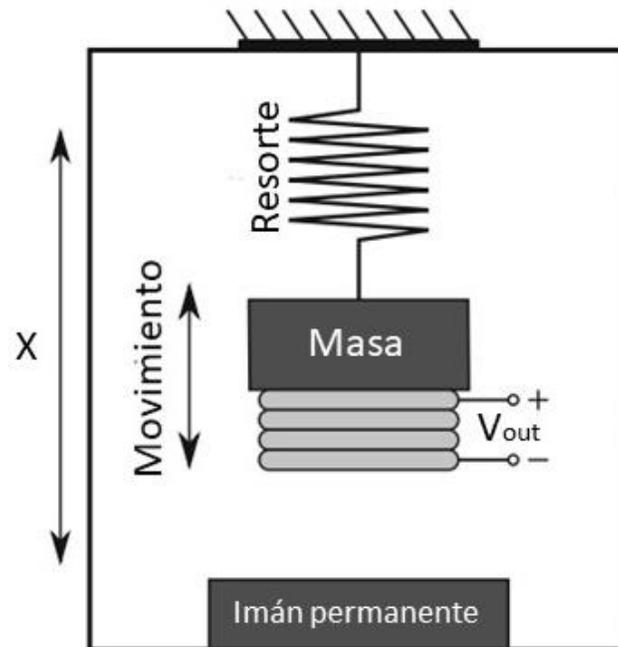


Figura 7. Esquemático donde se muestra un microgenerador con principio de transducción electromagnético.

### 2.4.3 Microgeneradores piezoeléctricos

Este tipo de microgeneradores están basados en la propiedad que tienen ciertos materiales de producir un campo eléctrico cuando son deformados mecánicamente "piezoelectricidad". El microgenerador piezoeléctrico más sencillo ilustrado en la Figura 8 consta de una viga anclada en un extremo sobre la cual se deposita una película de material piezoeléctrico. Además, en el extremo libre se coloca una masa sísmica la cual ayuda a ajustar la frecuencia de resonancia del microdispositivo.

Hay que mencionar que los dispositivos basados en este principio de transducción generan altos voltajes, son adecuados para la miniaturización y no requieren de fuentes de voltaje externas. Sin embargo, para su correcto funcionamiento requieren una carga conectada entre sus electrodos superior e inferior. Tienen la ventaja de proporcionar altos voltajes de salida, son adecuados para la miniaturización y no requieren de fuentes de voltaje externas. Su desventaja es que requieren de una gran resistencia de carga para operar correctamente. No requieren de depósitos de películas magnéticas a diferencia de los electromagnéticos. Con respecto a los sistemas electrostáticos, los dispositivos piezoeléctricos tienen la ventaja de no necesitar una alineación para funcionar correctamente.

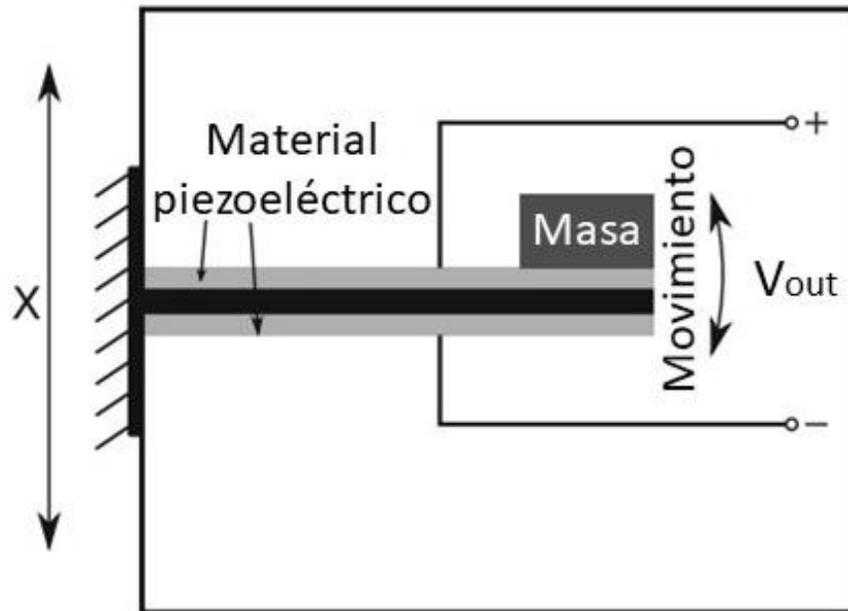


Figura 8. Esquemático donde se muestra un microgenerador en arreglo de viga en cantiléver

### 3. Marco Referencial

#### 3.1 Antecedentes

En los dispositivos MEMS se han aprovechado las propiedades de los materiales piezoeléctricos para producir energía eléctrica y alimentar diferentes tipos de sistemas electrónicos para una infinidad de aplicaciones. En la Tabla 3 se enlistan los diferentes tipos de materiales piezoeléctricos aplicados.

Tabla 3. Tipos de materiales piezoeléctricos y ejemplos de aplicación.

<b>Tipo de material</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Autor</b>
<b>PZT – 5A</b>	Microgenerador excitado por el impacto del movimiento humano	(Wei, 2013)
<b>PZT – 5H</b>	Reciclaje de cerámicas piezoeléctricas usadas en sensores electrónicos para construir un Energy Harvesting que aprovecha el movimiento humano (fase de balanceo del brazo)	(Afolayan, 2013)
<b>PMN - PT</b>	MEMS Energy harvesting de una viga en voladizo basado en mono cristales de plomo magnesio niobatos – titanato Zirconato de plomo	(Tang, 2014)
<b>PMN – PZT</b>	Energy Harvesting de una viga en voladizo basado en mono cristales de plomo magnesio niobatos – Titanato Zirconato de plomo	(Erturk, 2008)
<b>AZO</b>	MEMS piezoeléctrico Energy harvesters viga en voladizo fabricado de aluminio dopado con óxido de zinc	(Ralib, 2012)
<b>ZnO</b>	Nano generador Energy Harvesting con óxido de zinc	(Saravanakumar, 2014)
<b>AlN</b>	Energy harvester de una viga en voladizo excitada por vibración	(Cao, 2013)
<b>PVDF</b>	Generación de energía eléctrica a partir de la energía del viento	(Hidemi <i>et al.</i> , 2013)
<b>Piezo compuestos</b>	Energy harvesting para vibraciones de baja frecuencia	(Ju, 2013)

Dai (2009), realizó la aportación de un microgenerador piezoeléctrico utilizando material PZT – 5H como el ilustrado en la Figura 9, el cual, con una aceleración de 1 g y una frecuencia de oscilación de 51 Hz, desarrolló una potencia de 1.055 mW, la estructura utiliza una viga en cantiléver con una masa de prueba y un yugo magnético.

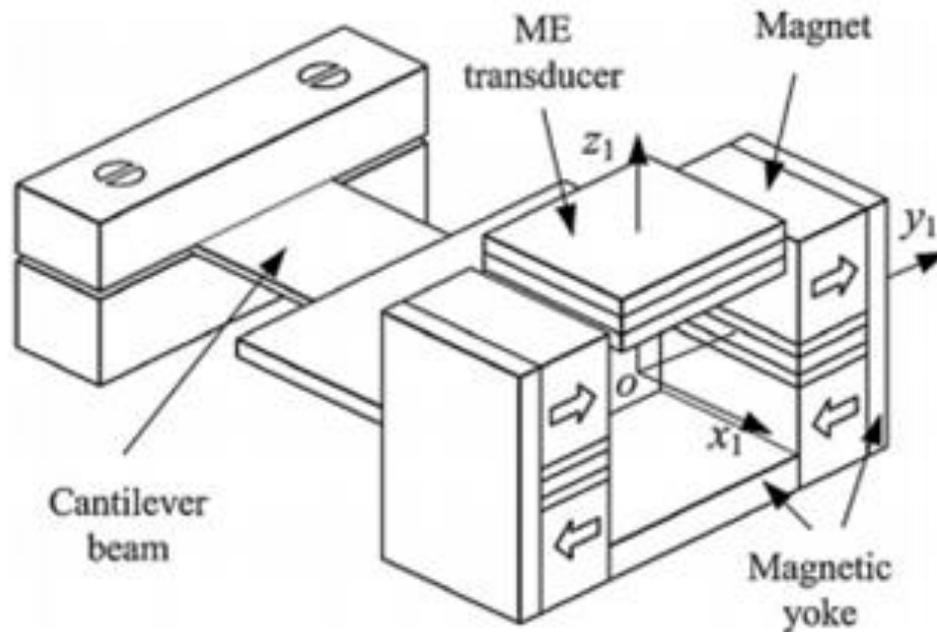


Figura 9. Esquemático de un generador de energía eléctrica basado en vibraciones mecánicas reportado por Dai, 2009.

Para fabricar un microgenerador, se recomienda utilizar como herramienta de diseño el análisis de elemento finito de los materiales piezoeléctricos. Para esto Ghasemi-Nejhad *et al.* (2006) proporciona una guía para el uso de software ANSYS® que contiene las herramientas necesarias para realizar las simulaciones pertinentes que sirven para predecir el comportamiento de los diseños propuestos (Ghasemi-Nejhad *et al.*, 2006).

Por otra parte, Gu (2011) utilizó el diseño de viga simple con una masa sísmica en uno de sus extremos como se ilustra en la Figura 10 logró desarrollar un microgenerador piezoeléctrico utilizando material PZT – 5A, el cual alcanzó a generar 1.08 mW de potencia de generación sometido a una aceleración de 0.4g y una frecuencia de 20.1 Hz. De igual modo incluye un microgenerador con vigas separadas, a frecuencia de resonancia de la estructura oscila de 1 a 30 Hz.

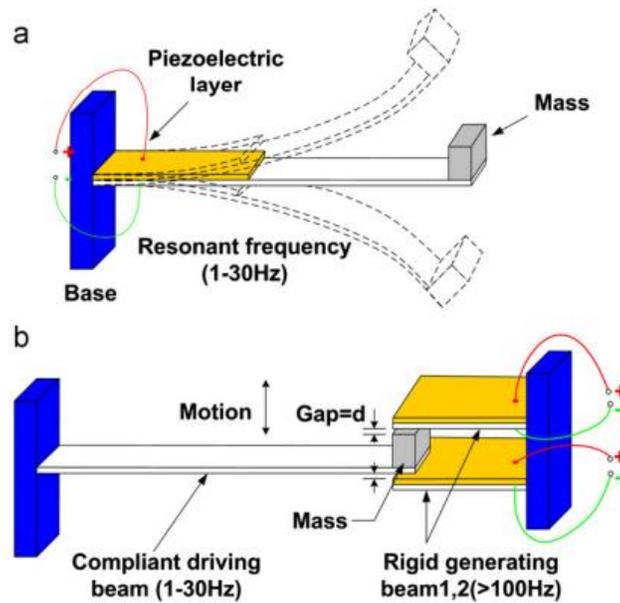


Figura 10. a) Microgenerador convencional utilizando viga en cantiléver con una masa sísmica fija en su extremo b) Microgenerador con sistema de captación de vibraciones por impacto con dos vigas separadas (Gu, 2011).

Normalmente, se implementan tres tipos de estructuras en el caso del diseño de generadores piezoeléctricos, pueden ser, estructuras de doble viga, diafragma y voladizo con doble soporte.

Por tanto, de los diseños de estructuras para generadores piezoeléctricos, la estructura de viga en cantiléver es la más recomendada. Esto debido a que para una fuerza de entrada dada se puede generar una mayor tensión en el material piezoeléctrico dependiendo del nivel de vibración. Por otra parte Tang (2014) logró desarrollar un microgenerador piezoeléctrico en base a material PZT, sometiendo su estructura a 1g de aceleración, a 514.1 Hz de frecuencia, alcanzó una potencia de generación de 11.56  $\mu$ W.

En relación con el microgenerador propuesto por Tang, en el extremo de la viga utiliza una masa de níquel como se observa en la Figura 11 que sirve para disminuir la frecuencia natural de la estructura y amplificar las vibraciones ambientales.

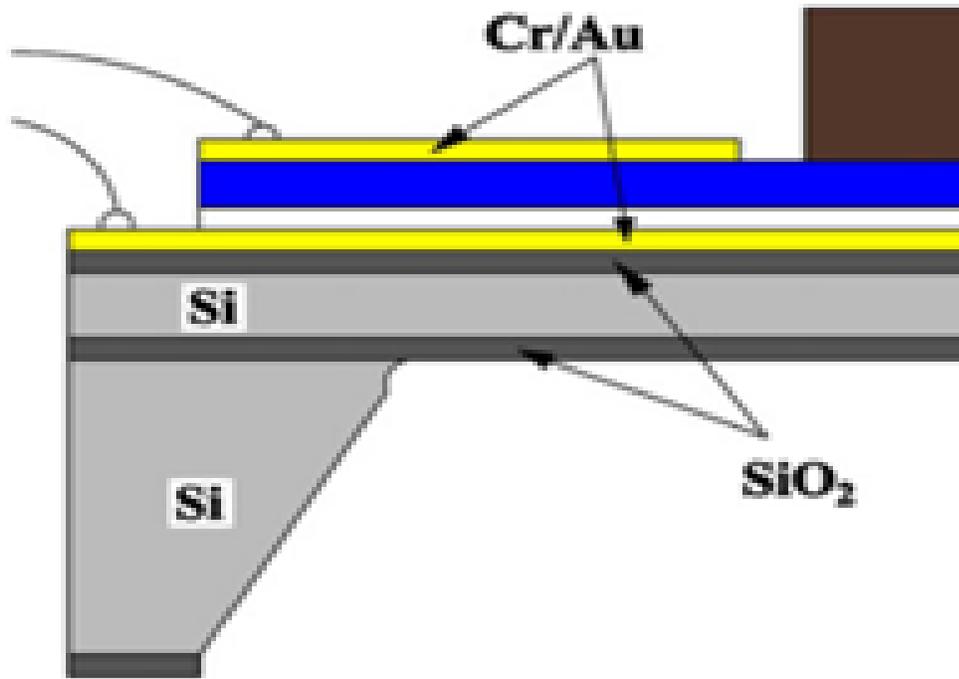


Figura 11. Esquemático de un microgenerador piezoeléctrico MEMS en modo d33 (Tang, 2014).

Un diseño diferente con el cual se logra recolectar energía de vibración a muy baja frecuencia es el de forma de espiral como el desarrollado por Song (2017), el diseño se muestra en la Figura 12. Presentó un generador de energía a partir de vibraciones mecánicas a micro escala; muestra una frecuencia de resonancia ultra baja y una alta potencia de generación.

Este autor diseñó un MEMS en forma de espiral para someterlo a vibraciones ambientales de baja frecuencia inferiores a 200 Hz y aceleraciones inferiores a 0.25 g utilizando "titanato Zirconato de plomo" PZT como material piezoeléctrico.

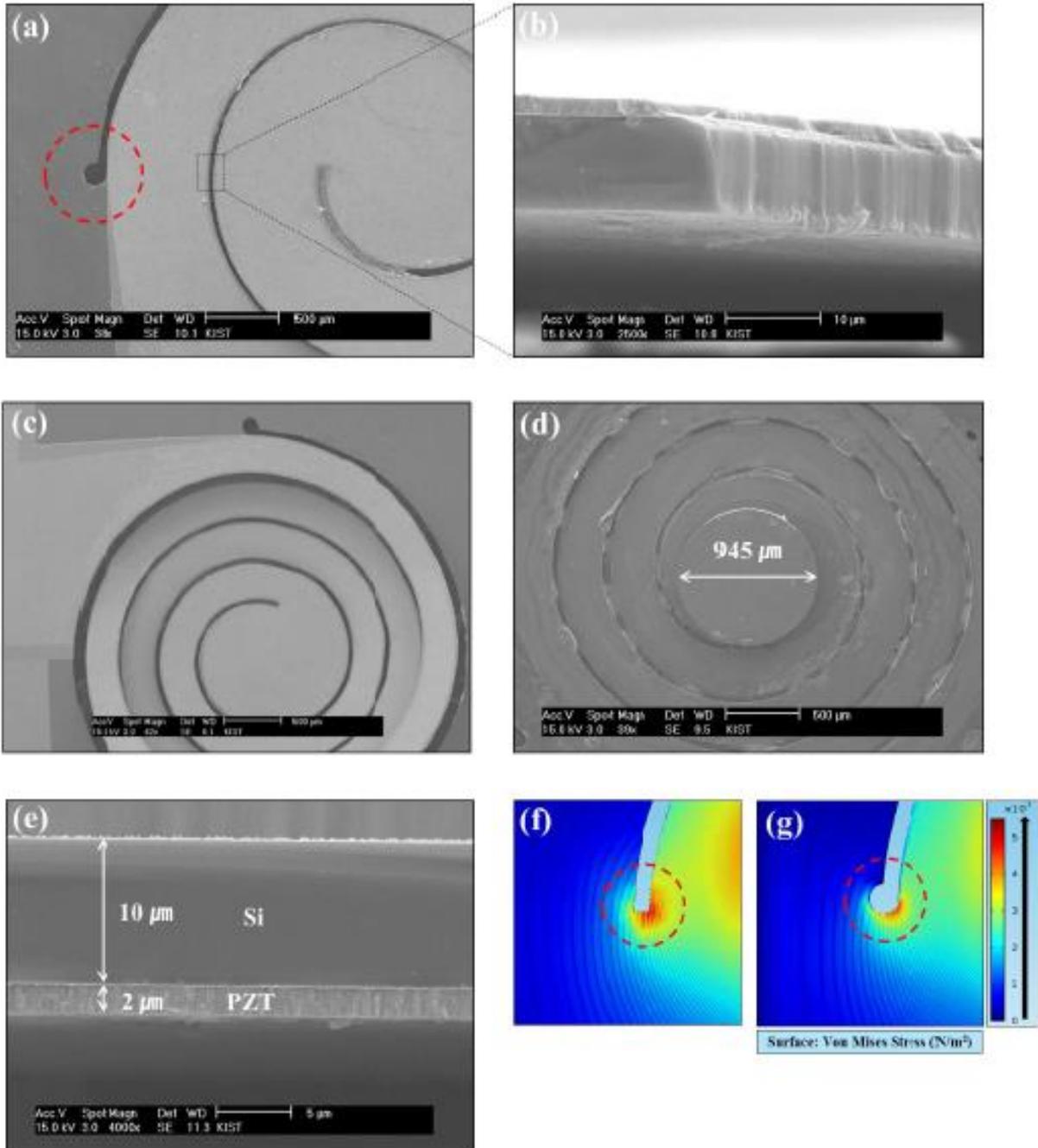


Figura 12. Imágenes de SEM del microdispositivo presentado por SONG a) Dos vueltas del espiral visto de frente, b) vista aumentada del borde grabado, c) Vista frontal del espiral de 4 vueltas, d) vista trasera del espiral, e) Sección transversal del generador, f) Simulación del estrés distribuido en la sección de anclaje y g) Unión redondeada al final del espiral del microgenerador (Song, 2017).

## 4. Problema de investigación

### 4.1 Situación problemática

Se sabe que varios componentes utilizados en la fabricación de baterías son tóxicos, por lo tanto, la contaminación ambiental y los riesgos de afectar a la salud y a los ecosistemas dependen de la forma, lugar y volumen en el que se han dispuesto o tratado este tipo de residuos.

Además se calcula que, en el territorio nacional en los últimos 43 años, se han liberado al ambiente aproximadamente 635 mil toneladas de pilas cuyos contenidos incluyen elementos dañinos para el ambiente (Castro y Díaz, 2004)

Así mismo se estiman 145 918 toneladas de dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ) y otros elementos tóxicos como 1,232 toneladas de mercurio (Hg); 22,063 toneladas de níquel (Ni); 20,169 toneladas de cadmio (Cd) y 77 toneladas de compuestos de litio (Li). Dichas sustancias tóxicas representan casi el 30 % del volumen total de residuos antes mencionado, es decir, aproximadamente 189,382 toneladas de materiales tóxicos para el periodo comprendido entre 1960 y 2003. Las cifras anteriores se calcularon a partir de datos oficiales sobre población, producción, importación y exportación (Castro y Díaz, 2004).

Por otra parte, el consumo de pilas y baterías, primarias “no recargables o desechables” y secundarias “recargables” tiende a incrementarse año tras año, no sólo por el crecimiento de la población sino también por el incesante aumento de la cantidad de aparatos y artefactos que las utilizan. Por lo anterior, se debe tener en cuenta la toxicidad de sus compuestos en virtud del incesante crecimiento de este tipo de residuos dentro del flujo de los residuos sólidos urbanos “RSU” o residuos domiciliarios “RD” y en los sitios de disposición final (Martínez *et al.*, 2005).

Todas las pilas y baterías contienen materiales contaminantes “generalmente metales” que tienen la potencialidad de ser liberados y causar impactos en su tratamiento “según la tecnología” y disposición final.

Aunque las pilas contribuyen en bajo porcentaje al volumen total de residuos sólidos urbanos, son una de las corrientes con mayor aporte de metales pesados al total de este tipo de residuos.

A continuación, se describen los diferentes tipos de pilas y baterías que se encuentran actualmente en el mercado:

Tabla 4. Clasificación y uso de las pilas y baterías primarias.

Tipos de pila	Componentes	Características
Pilas no recargables		
<b>Zinc - Carbono</b>	Carbono de grafito de Dióxido de magnesio, Zinc chapa metálica y Cloruro de amonio	Para todo tipo de equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo.
<b>Zinc - Dióxido de magnesio</b>	Dióxido de magnesio, Zinc en polvo, Hidróxido de potasio	Equipo eléctrico y electrónico de bajo consumo, con vida útil mayor que las de las baterías comunes con blindaje para evitar derrames
<b>Óxido de mercurio</b>	Óxido de mercurio y zinc	Para audífonos y equipo médico, contienen 30% de mercurio
<b>Zinc - Aire</b>	Oxígeno - Zinc	Uso en calculadoras, relojes y cámaras fotográficas. Contienen alrededor de 1% de mercurio
<b>Óxido de plata</b>	óxido de plata, amalgama de zinc e hidróxido de potasio	Uso en calculadoras, relojes y cámaras fotográficas. Contienen alrededor de 1% de mercurio
<b>Litio</b>	Magnesio, carbono, hierro y litio	Uso en calculadoras, relojes, cámaras, memorias de computadoras, aplicaciones militares e industriales. Producen 3 veces más energía que las pilas alcalinas.

Fuente: Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. Montevideo, Uruguay. Septiembre 2005. Instituto Nacional de Ecología.

Tabla 5. Clasificación y uso de las pilas y baterías secundarias

Tipos de pila	Componentes	Características
<b>Pilas no recargables</b>		
<b>Níquel - Cadmio</b>	Hidróxido de níquel, cadmio e hidróxido de potasio.	Uso en todo tipo de equipo eléctrico y electrónico sencillo, teléfonos celulares y computadoras portátiles.
<b>Níquel - Hidruro metálico</b>	Óxido de níquel, hidruro metálico e hidróxido de potasio.	Uso en todo tipo de equipo eléctrico y electrónico sencillo, teléfonos celulares y computadoras portátiles. Mecanismo igual que la de níquel cadmio donde el cadmio es reemplazado por una aleación metálica que puede almacenar hidrógeno que cumple el papel de ánodo.
<b>Ion Litio</b>	Óxidos metálicos con litio, carbón de grafito, sales de litio y solventes orgánicos.	Utilizadas para telefonía celular, cámaras fotográficas y computadoras.
<b>Plomo</b>	Óxido de plomo, plomo y ácido sulfúrico.	Uso automotriz, industrial y doméstico.

Fuente: Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. Montevideo, Uruguay. Septiembre 2005. Instituto Nacional de Ecología.

#### 4.1.1 Efectos de los componentes de las baterías

En la tabla 6 se presentan los efectos de algunos componentes de las pilas en la salud de las personas.

Tabla 6. Efecto de algunos de los componentes presentes en las baterías.

<b>Mercurio</b>	Teratogénico; efectos sobre el sistema nervioso central, cardiovascular y pulmonar. Provoca daños a los riñones y la vista.
<b>Plomo</b>	Probable Teratogénico. Provoca daños en los riñones o el cerebro; provoca daños sobre el sistema nervioso central y reproductivo, provoca desordenes en las células de la sangre.
<b>Cadmio</b>	Probable cancerígeno y teratogénico, embriotóxico; Efectos en el sistema nervioso central, sistema reproductivo y respiratorio, daño en riñones

- Níquel** Probable cancerígeno; Probable teratogénico; efectos sobre el sistema pulmonar/respiratorio; alergias; irritación en ojos y piel; Daños en el hígado y riñones.
- Litio** Fallas respiratorias, depresión del miocardio y edema pulmonar. Se ha encontrado ser de alta toxicidad cuando es administrado erróneamente o usado en casos de suicidio, afecciones del sistema nervioso, provocando anorexia, náusea, movimientos involuntarios musculares, apatía, confusión mental, visión borrosa, temblores, estado de coma y muerte.
- Manganeso** La exposición a niveles de manganeso muy altos por largo tiempo ocasiona perturbaciones mentales y emocionales, provoca movimientos lentos y faltos de coordinación. Esta combinación de síntomas constituye una enfermedad llamada “Manganismo” que afecta a la parte del cerebro que ayuda a controlar los movimientos.  
A pesar de que la ingesta de manganeso es contemplada como poco tóxica, se han registrado casos de exposición oral a altas dosis del metal que han presentado trastornos neurológicos.

---

Fuente. (Jung *et al.*, 2015)

#### **4.2 Delimitación del problema**

En términos generales, las pilas, al ser desechadas, se oxidan con el paso del tiempo por la descomposición de sus elementos y de la materia orgánica que las circunda, lo que provoca daños a la carcasa o envoltura y, por consiguiente, la liberación al ambiente de sus componentes tóxicos a los suelos cercanos y a los cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Otras causas de considerable importancia que contribuyen a la liberación de esos componentes son los incendios de los basureros o la quema intencional de basura, lo cual representa un aporte significativo de esos contaminantes al aire. (Castro y Díaz, 2004).

#### **4.3 Planteamiento del problema**

En la industria del automóvil se generan desechos cuyo control no está del todo de finido; sobre todo en el caso de pequeños talleres automotrices en México.

Así mismo, el problema de la presente investigación se basa en lograr extender la vida útil de un sensor de TPMS de uso automotriz, con esto podemos minimizar la producción de éste residuo, el cual, es peligroso si llega al ambiente, por la pila que utiliza en su interior para funcionar, provocando las afectaciones ya mencionadas en los apartados anteriores.

#### **4.4 Pregunta de investigación**

¿Cuánta potencia eléctrica genera un microgenerador piezoeléctrico, basado en óxido de zinc, que recolecta energía ambiental producida por vibraciones mecánicas?

#### **5. Justificación**

El desarrollo de microdispositivos piezoeléctricos para cosecha de energía ambiental favorecerá a la reducción en el uso de baterías para alimentar dispositivos electrónicos pequeños; el presente trabajo se desarrollará un microdispositivo piezoeléctrico a base de Óxido de zinc.

Así mismo en la aplicación de un microgenerador piezoeléctrico se reemplazará el uso de materiales piezoeléctricos PZT por Óxido de Zinc. Lo anterior logra reducir el impacto ambiental que pueden producir los residuos del PZT, es considerado un material tóxico a diferencia del óxido de zinc; cuyo grado de toxicidad es inferior sin comprometer la capacidad de producción de energía. El desarrollo de esta tecnología se ha practicado a nivel mundial.

Finalmente, la aplicación de una geometría trapezoidal permite optimizar la producción de energía, ya que se logra una mejor distribución de esfuerzos en la capa de óxido de zinc, pudiendo alcanzar una deformación capaz de mejorar la eficiencia de producción de energía.

#### **6. Hipótesis**

Usando óxido de zinc como material piezoeléctrico en la fabricación de microgeneradores, se puede transformar la energía cinética de las vibraciones mecánicas en energía eléctrica en el orden de  $\mu\text{W}$ .

## 7. Objetivos

### 7.1 Objetivo General

Diseñar y modelar un microdispositivo usando óxido de Zinc como material piezoeléctrico para generar energía eléctrica del orden de los  $\mu\text{W}$  a partir de las vibraciones mecánicas.

### 7.2 Objetivos particulares

**OP1.** Diseñar mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) un microgenerador piezoeléctrico de óxido de Zinc basado en vibraciones mecánicas.

**OP2.** Realizar modelos de elementos finitos para predecir: frecuencia natural, desplazamientos estáticos, esfuerzos mecánicos, voltaje y potencia eléctrica generada por el microgenerador piezoeléctrico.

**OP3.** Determinar la ecuación característica del modelo y someter el diseño obtenido a diferentes aceleraciones con la intención de identificar la frecuencia óptima de trabajo.

## 8. Materiales y métodos

Para lograr los objetivos planteados en este trabajo de investigación, se desarrollaron las actividades que se muestran en la Figura 13.

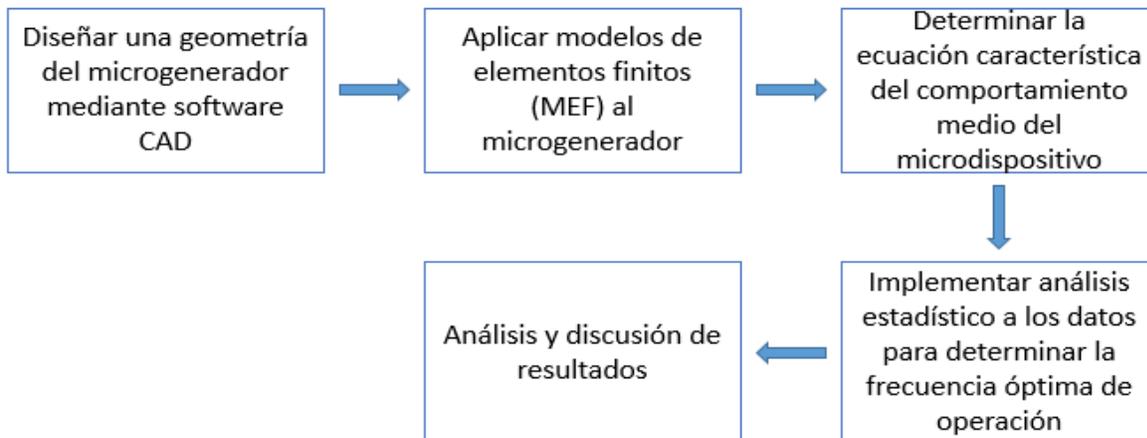


Figura 13. Diagrama de flujo donde se muestran las actividades realizadas en este proyecto de investigación

El Análisis MEF sirvió para:

- Determinar la frecuencia natural de la estructura propuesta.
- Determinar los modos de vibración a diferentes frecuencias de excitación.
- Determinar el análisis de respuesta armónica
- Determinar la potencia de energía eléctrica generada a diferentes frecuencias de vibración

Para llevar a cabo el presente proyecto de investigación, se realizaron cuatro etapas que consistieron en la búsqueda de información, diseño de la geometría del microgenerador mediante software CAD; Análisis mecánico y fatiga mediante el Modelo de Elementos Finitos (MEF); obtención de datos; análisis y discusión de resultados; escritura de Tesis.

### **8.1 Búsqueda de información**

Se recopiló información científica en bases de datos a texto completo y en Revistas Indexadas para crear el Estado del Arte de este proyecto de investigación. Algunas de las revistas y bases de datos citadas fueron "Sensors and Actuators, Microsystem technologies, IEEE, International journal of precision engineering and manufacturing, Microelectronics Journal entre otros citados al final del documento.

Algunas de las bases de datos solicitadas fueron Scopus y Web of science.

Por otra parte, se realizó una búsqueda exhaustiva acerca de los requerimientos en los sensores TPMS, investigando marcas y hojas de datos. Esto para tener un punto de partida de cuál fue la demanda a cubrir por el microdispositivo del diseño propuesto.

### **8.2 Diseño de la geometría del microgenerador piezoeléctrico mediante software CAD**

Se diseñó el microgenerador en tercera dimensión (3D) mediante un software de diseño asistido por computadora CAD utilizando SOLIDWORKS® en su versión 17.

El microgenerador propuesto está formado por una viga de forma trapezoidal la cual esta fija en un extremo. La forma trapezoidal se aplicó debido a que, con esta, se obtuvo una mejor distribución de esfuerzos por unidad de área. Esto permitió optimizar la generación de energía en el sustrato de ZnO.

Además, la parte superior de la geometría se diseñó de manera rectangular y ligeramente alargada cuyas dimensiones son 3 mm por 5 mm. El objetivo de haber diseñado de esta manera la parte superior de la geometría fue para que el mismo peso debido a las dimensiones de la figura fungiera como masa sísmica; esto ayudó a no tener que realizar otro proceso de depósito para añadir masa sísmica, por lo que el proceso de fabricación se vuelve más sencillo y tenemos un microdispositivo simple de un sustrato y única mente dos capas de depósito.

Por otro lado, las dimensiones de la geometría se muestran en la Figura 14 y fueron diseñadas apegándose a los requerimientos de tamaño, peso y frecuencia de resonancia para ser aplicados a un sistema de medición de presión de aire en un neumático automotriz TPMS, teniendo en cuenta que el microdispositivo debe trabajar fuera de resonancia ya que mientras el neumático se encuentre en funcionamiento la magnitud de las aceleraciones y frecuencia no provoquen la falla del mismo.

En cuanto a la parte inferior del microdispositivo se observa un suavizado en las curvas de los bordes de los trapecios base, cuyo radio es de 0.25 mm; Éste suavizado se optimizó mediante el análisis de elementos finitos para evitar que se generen esfuerzos que sobrepasen los límites de flexión de los materiales que componen la estructura, esto para evitar una fatiga prematura, ya que si se dejan esquinas pronunciadas sin suavizar el esfuerzo en la zona se eleva drásticamente propiciando la falla de la estructura.

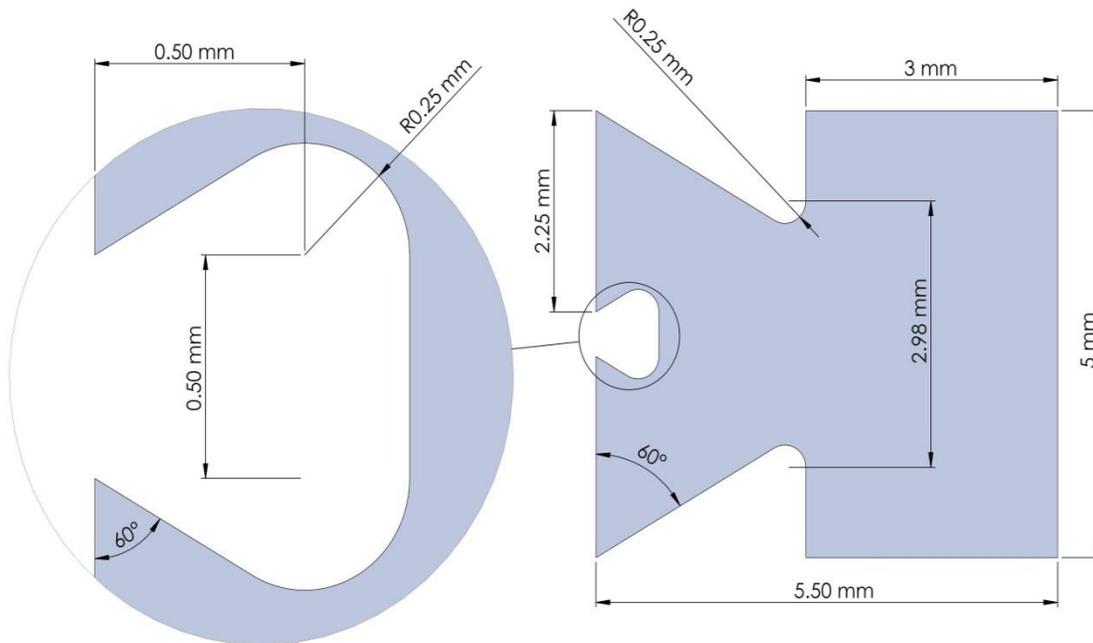


Figura 14. Esquemático donde se muestran las dimensiones del sustrato del microgenerador.

### 8.3 Modelado de elementos finitos

En esta etapa se aplicaron modelos analíticos y de elementos finitos los cuales sirvieron para predecir el comportamiento mecánico y eléctrico que tuvo el microgenerador de acuerdo a la estructura diseñada en el paso anterior. En este paso se utilizó como software de apoyo ANSYS® en su versión 17.2 debido a que tiene la capacidad de predecir el comportamiento eléctrico de los materiales piezoeléctricos.

#### 8.3.1 Análisis modal

En este análisis donde se aplica el desarrollo de modelos de elementos finitos se estimó la potencia eléctrica generada, los esfuerzos mecánicos principales, la frecuencia de resonancia y los desplazamientos máximos del microgenerador. Se tomaron en cuenta las propiedades mecánicas listadas en la Tabla 7. Además, se deben tomar en cuenta la matriz piezoeléctrica y la matriz dieléctrica del ZnO mostrado en la Tabla 8 (Pan *et al.*, 2012).

Tabla 7. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en los modelos numéricos

Propiedad	ZnO	Cobre	Acero AISI 302	bronce
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	5665	8300	7860	8800
Módulo de Young (GPa)	137	128	193	70
Relación de Poisson	0.25	0.34	0.25	0.34

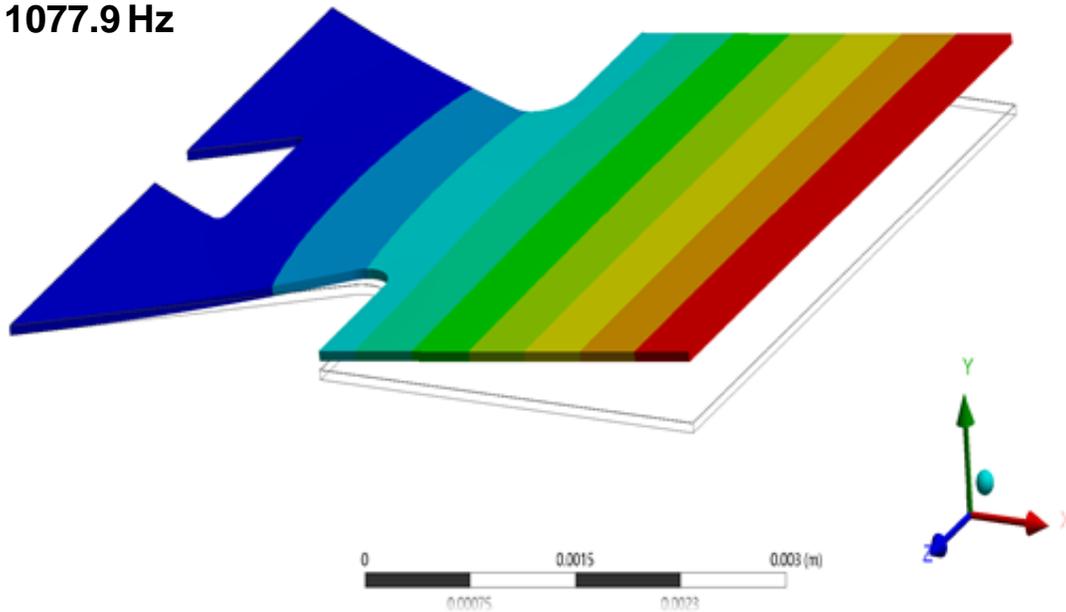
Tabla 8. Matrices piezoeléctricas de la película de ZnO utilizadas en los modelos numéricos del microgenerador.

$$[e] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -0.570878 \\ 0 & 0 & -0.570878 \\ 0 & 0 & 0.428446 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.480816 & 0 \\ -0.480816 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{6 \times 3} \text{ C/m}^2$$

$$[\varepsilon_r] = \begin{pmatrix} 7.57 & 0 & 0 \\ 0 & 7.57 & 0 \\ 0 & 0 & 8.31 \end{pmatrix}_{3 \times 3} \text{ C/m}^2$$

Del análisis modal realizado se obtuvo la frecuencia de resonancia y primer modo de vibración observado en la Figura 15.

**Modo 1:  
1077.9 Hz**



*Figura 15.* Resultado del análisis modal donde se muestra que el microgenerador presenta movimiento fuera del plano con frecuencia de resonancia de 1.0779 kHz

En cuanto a los modos de vibración, en las Figuras 16 y 17 se pueden observar los primeros 4 modos con sus respectivas frecuencias a las que ocurren. El modo de vibración es la forma en que va a vibrar el microdispositivo cuando éste es excitado a una cierta frecuencia.

Cabe mencionar que el modo que nos interesa es el modo 1, el cual se da en el intervalo de vibración de 1 a 1 kHz, mismo que es el que se presenta en el neumático automotriz en el cual será instalado el microgenerador.

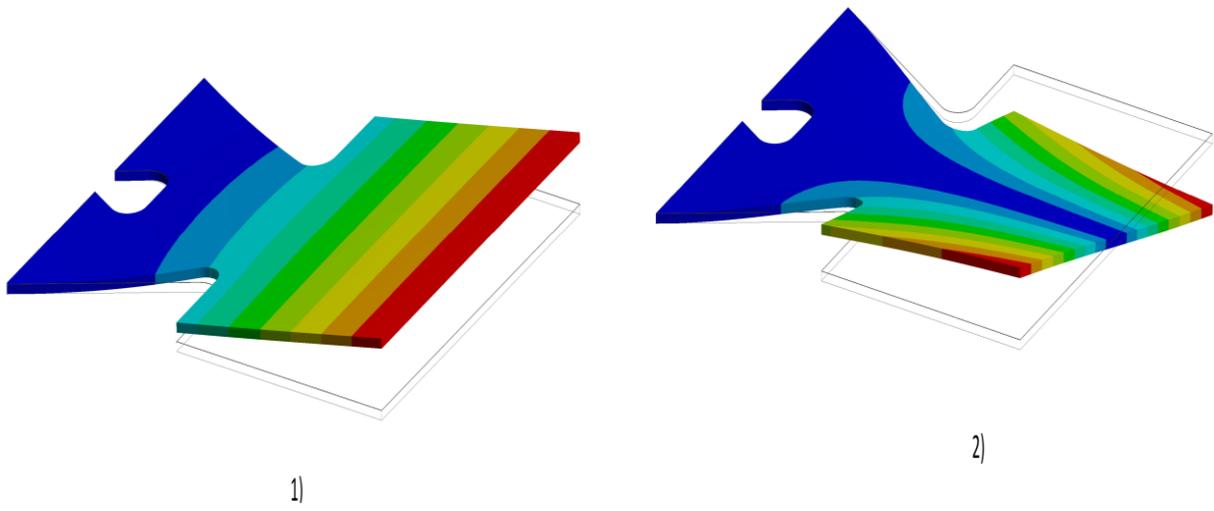


Figura 16. Primeros 4 modos de vibración 1) primero 1077.9 Hz 2) segundo 2837.3 Hz

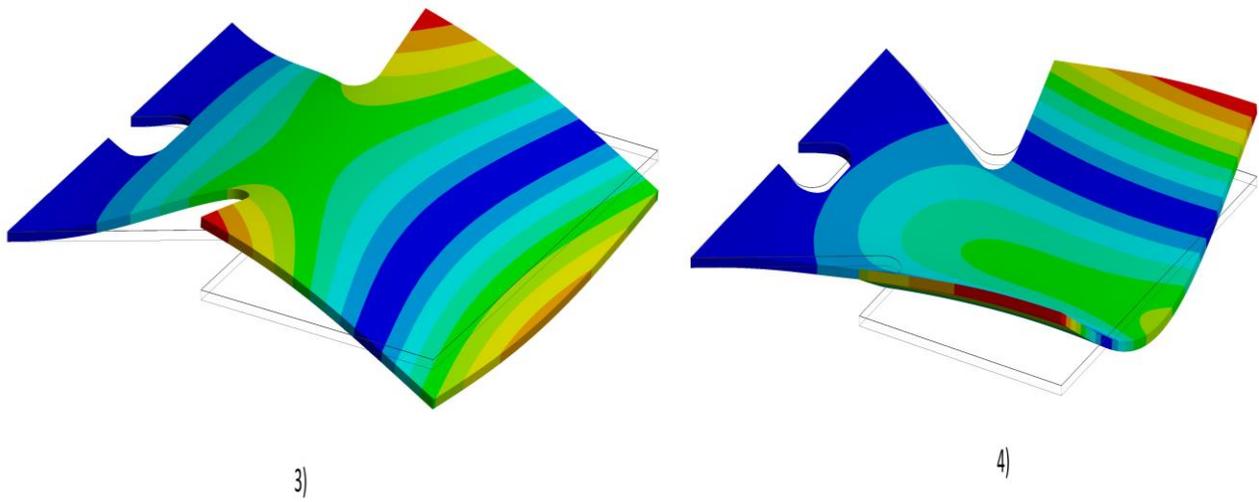
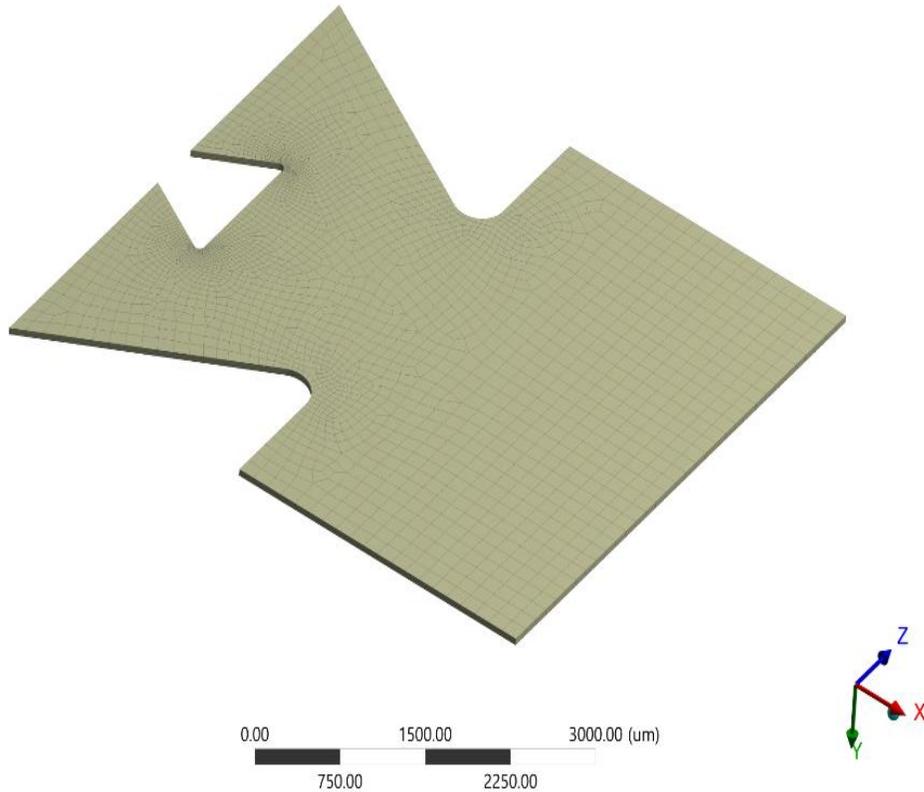


Figura 17. Primeros 4 modos de vibración 3) tercero 7426 Hz 4) cuarto 11389 Hz

### 8.3.2 Análisis de sensibilidad de malla

Para asegurarse que los resultados de los modelos numéricos no varíen al cambiar el número de elementos de la malla, se realizó un análisis de sensibilidad o independencia de malla. En este análisis se varió el número de elementos de la malla desde 5,000 hasta 25,000 elementos. De los resultados obtenidos, se observó que a partir de 18,000 elementos los resultados de la frecuencia natural no tienen variación significativa como se muestra en la Figura 18.



*Figura 18.* Vista de la distribución de la malla utilizada para el análisis.

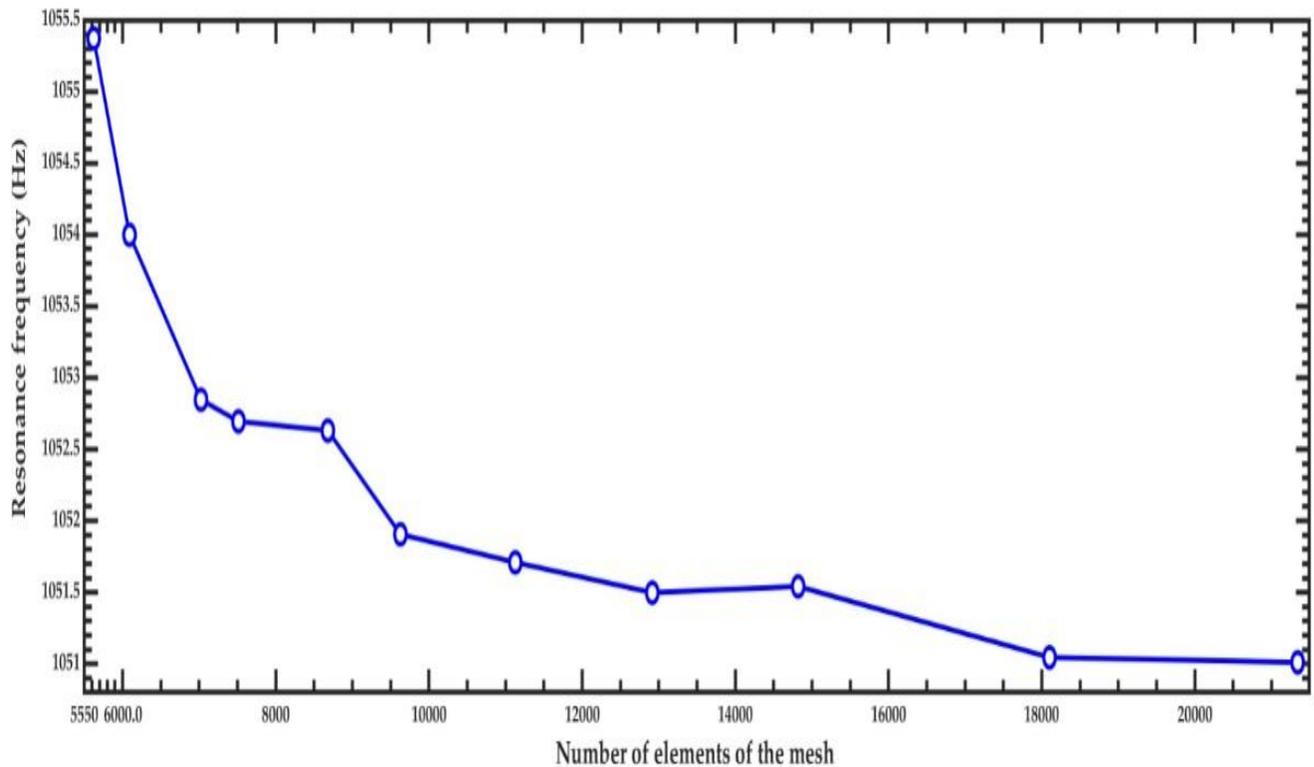


Figura 19. Gráfico del análisis de sensibilidad de malla.

### 8.3.3 Análisis estático estructural

Se realizó un análisis estático estructural para determinar la deflexión del microgenerador debida a la aceleración de la gravedad. Con la estructura anclada del lado izquierdo se observa que, por el peso de la viga, la parte rectangular de lado derecho sufre un desplazamiento hacia abajo. El desplazamiento con respecto a un plano horizontal se observa por colores, yendo desde el color azul fuerte, que representa que la estructura no se desplaza con respecto al plano, hasta el color rojo el cual indica la parte de la estructura que más se desplaza con respecto al plano.

De este análisis se obtuvo un desplazamiento estático máximo de  $0.31934 \mu\text{m}$  como lo muestran las Figuras 20 y 21.

En la Figura 20 se aprecia la situación explicada en la sección anterior donde en la parte inferior de los trapecios base, los esfuerzos se concentran mayormente en las zonas de las curvas suavizadas.

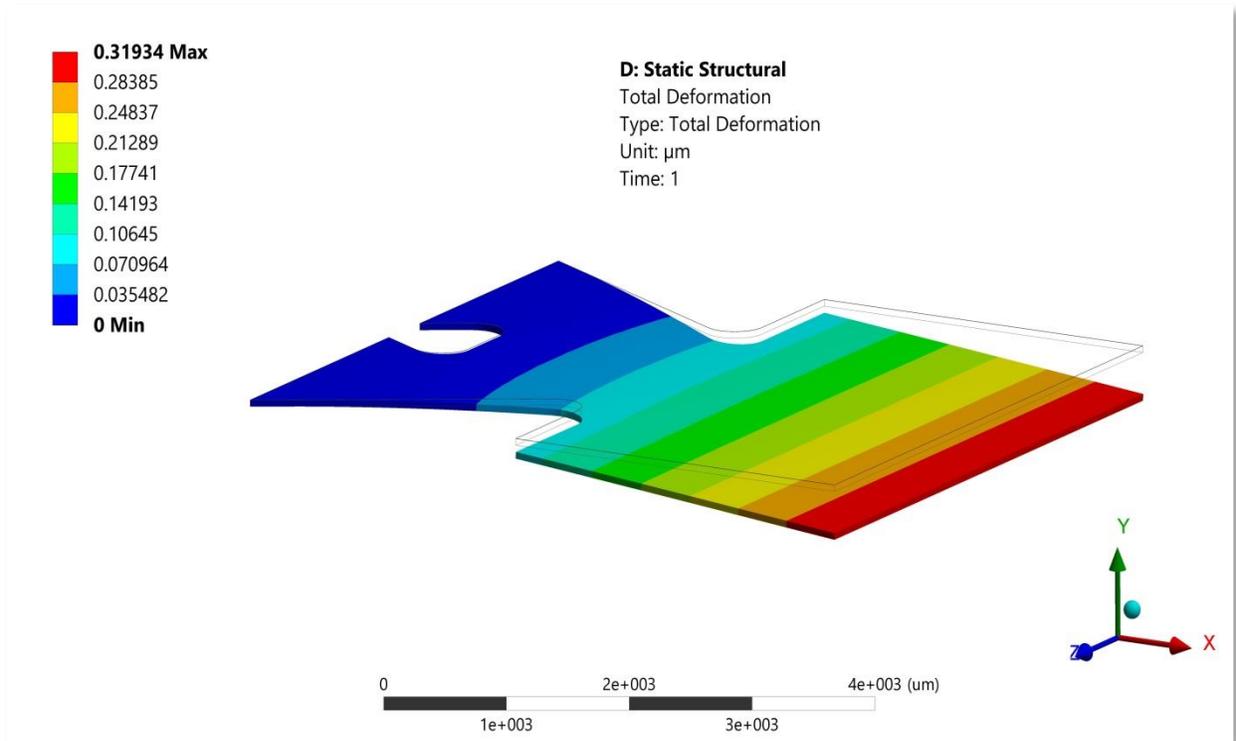


Figura 20. Desplazamiento estático obtenido del análisis estático estructura.

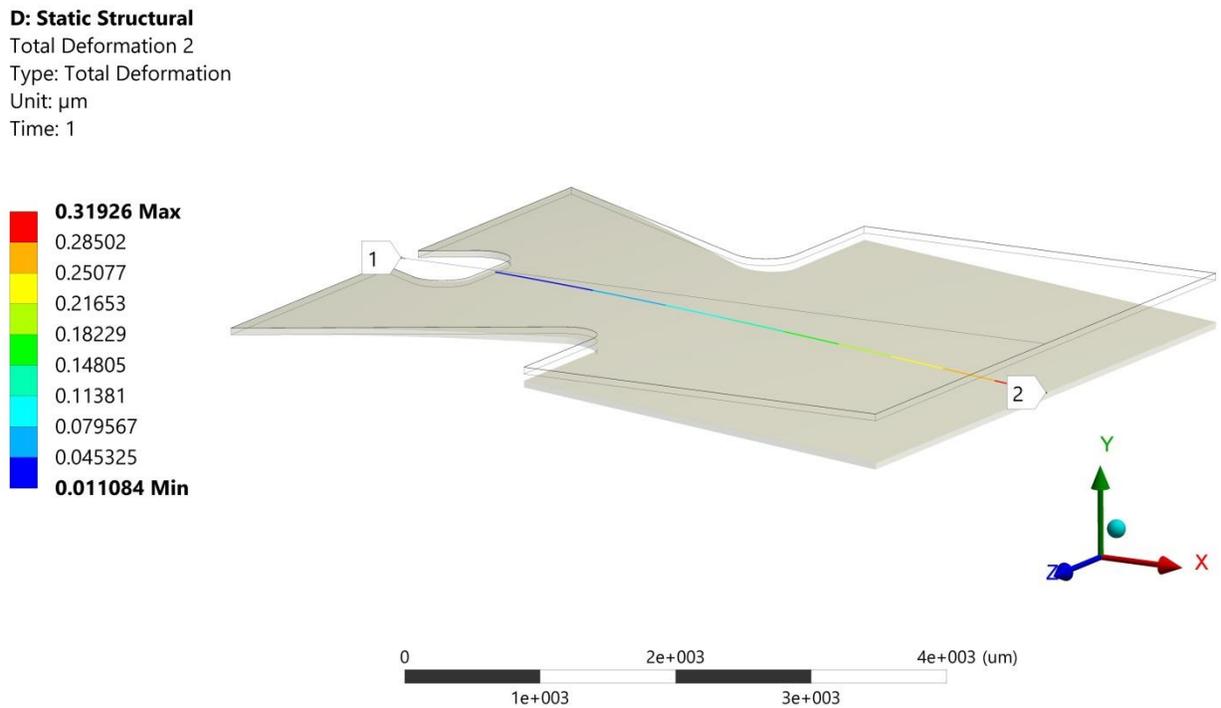


Figura 21. Desplazamiento estático.

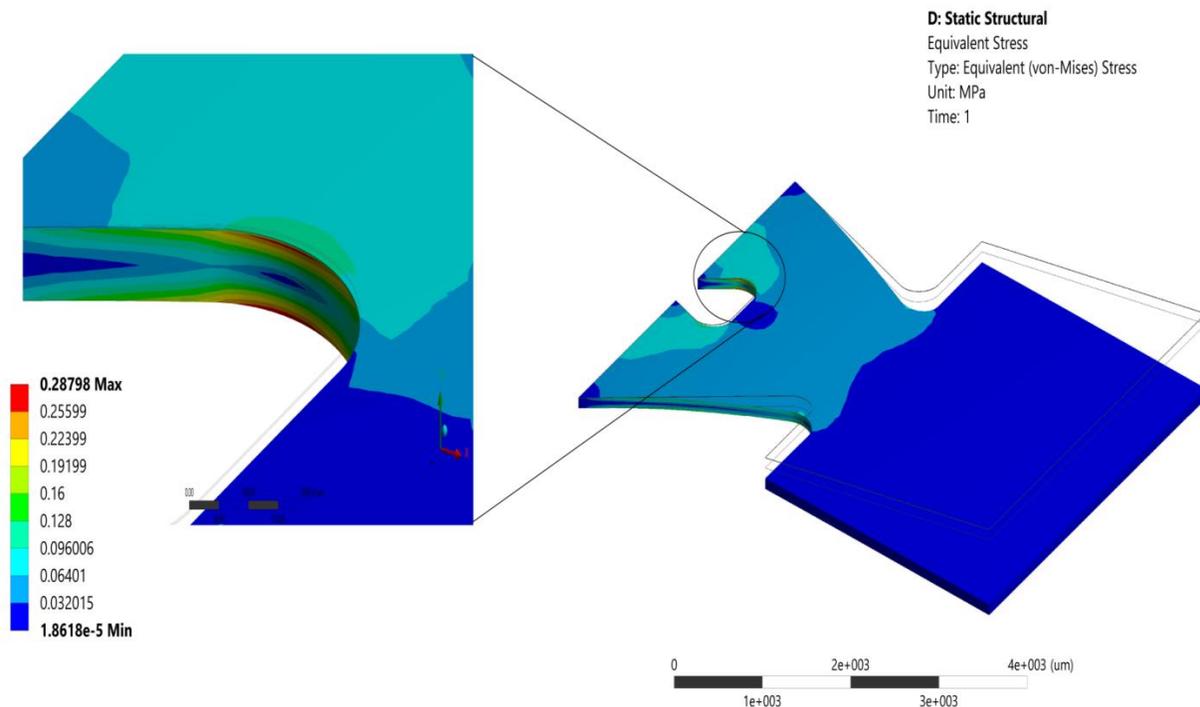


Figura 22. Esfuerzo de flexión debido al peso de la estructura.

En la Figura 22 se observa que por los efectos de la gravedad se produce un esfuerzo de 0.287 MPa en la parte inferior del sustrato y en la parte superior del electrodo superior.

En cuanto a distribución de esfuerzos, de acuerdo a lo mencionado en la justificación del uso de geometría trapezoidal, igualmente en la Figura 22 se observa a través de la coloración azul tenue, que el patrón de la distribución es uniforme a gracias a la geometría; teniendo una mayor concentración en la parte inferior donde se presentan curvaturas.

### 8.3.4 Análisis de respuesta armónica

Un análisis de respuesta armónica fue realizado para predecir el desplazamiento dinámico, esfuerzos principales y voltaje generado cuando el microgenerador opera a diferentes frecuencias. En dicho análisis se tomó en cuenta el amortiguamiento que ofrece el aire alrededor del dispositivo. Este amortiguamiento fue determinado a través del factor de calidad ( $Q$ ) y se puede escribir como:

$$\zeta = \frac{1}{2Q}; \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

$\zeta$  = Amortiguamiento debido al aire alrededor del dispositivo a través del factor de calidad

Q = Factor de calidad

Para calcular el amortiguamiento se consideró la estructura del microgenerador como una viga en cantiléver rectangular con longitud  $L_e$ , espesor  $h$  y ancho  $b$ . para este caso el amortiguamiento debido al aire ( $Q_a$ ) puede calcularse usando el modelo de Blom (Blom *et al.*, 1992):

$$Q_a = \frac{f_r \rho_s b h L_e}{3\mu R \left(1 + \frac{R}{\beta}\right)}; \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$Q_a$  = Amortiguamiento debido al aire

$f_r$  = Frecuencia de resonancia del microgenerador

$\rho_s$  = Densidad del sustrato

$b$  = Ancho de la viga

$h$  = Espesor de la viga

$\mu$  = Viscosidad dinámica del aire

R = Constante calculada con respecto a las dimensiones del microgenerador

con:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho_a f_r}}; \quad (\text{Ecuación 3})$$

Siendo:

$\mu$  = Viscosidad dinámica del aire

$\rho_a$  = Densidad del aire

$f_r$  = Frecuencia de resonancia del microgenerador

$$R = \sqrt{\frac{bL_e}{\pi}}; \quad \text{(Ecuación 4)}$$

$L_e$  = Longitud de la viga

$b$  = ancho de la viga

Así mismo, para estimar la viscosidad y densidad del aire se realizaron cálculos respectivamente con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del dispositivo, esto debido a que las llantas de un automóvil contienen aire a presión lo cual tiene como efecto un cambio en la densidad del aire contenido en ellas; el calor que se genera en los neumáticos es debido a la fricción que experimenta durante el rodaje y es proporcional a la velocidad de desplazamiento, depende también de la presión de inflado inicial y la carga del vehículo.

De acuerdo a los datos proporcionados por la patente US 9,636,955 B2 la cual presenta un algoritmo para la estimación de la temperatura en un neumático automotriz considerando las condiciones de deformación e histéresis en el neumático, la convección en el aire, transferencia de calor entre el suelo y pavimento y la transferencia de calor interna, dice que la temperatura puede alcanzar desde la temperatura ambiente con el vehículo partiendo del reposo hasta 90 °C y 125 °C cuando se encuentra en movimiento (Singh *et al.*, 2017).

Como se observa en la Ecuación 2 si cambia la densidad y viscosidad del aire, también se ve modificado el factor de amortiguamiento en la estructura del harvester, por lo que la deflexión y por ende la generación de energía se verían comprometidas. En las Tablas 9, 10 y 11 se aprecian los cambios en la presión, densidad y viscosidad del aire con respecto a los cambios de temperatura en el neumático con el fin de comprobar las variaciones en el amortiguamiento del mismo.

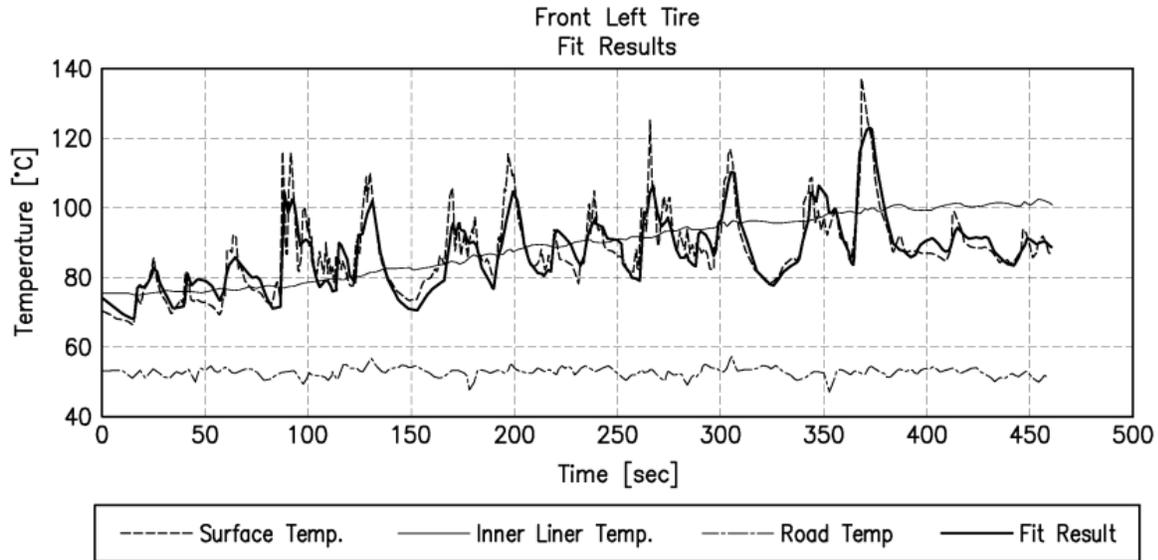


Figura 23. Temperatura de un neumático en funcionamiento (Singhet al., 2017)

En la Figura 23 se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en un neumático en funcionamiento inflado con aire, se aprecia que existen variaciones con picos de 125 °C; en este caso la medición está realizada en el neumático frontal izquierdo, cada neumático en el automóvil desarrolla los mismos picos de temperaturas.

Primero se calculó el incremento de la presión con respecto a la temperatura aplicando la ecuación de estado de gases ideales, los resultados de las gráficas se observan en la Tabla 9 (Çengel *et al.*, 2006) donde:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Siendo:

$P_1$  = Presión inicial

$V_1$  = Volumen inicial

$T_1$  = Temperatura inicial

$P_2$  = Presión en estado 2 o final

$V_2$  = Volumen en estado 2 o final

$T_2$  = Temperatura en estado 2 o final

Tabla 9. Incremento de presión vs temperatura.

<b>TEMPERATURA</b>	<b>PRESIÓN</b>
<b>°C</b>	<b>MANOMÉTRICA (PSI)</b>
25	30.00
30	30.75
35	31.49
40	32.24
45	32.99
50	33.73
55	34.48
60	35.23
65	35.97
70	36.72
75	37.47
80	38.21
85	38.96
90	39.70
95	40.45
100	41.20

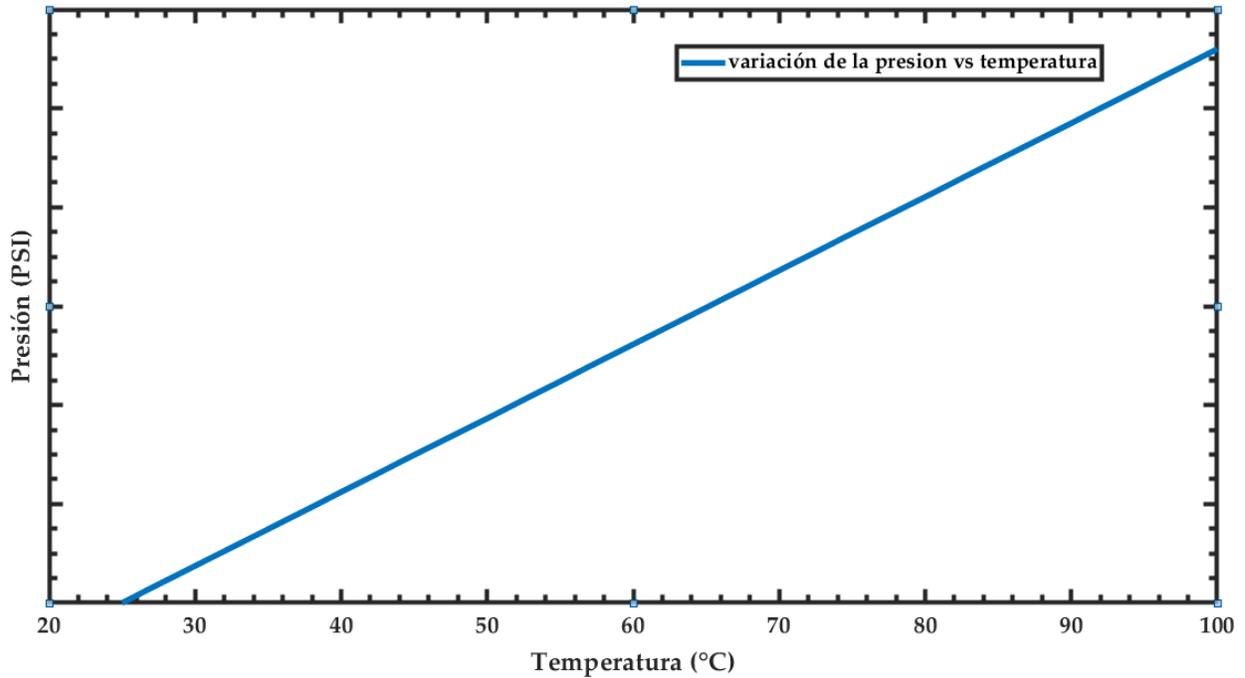


Figura 24. Incremento de la presión por la temperatura de un neumático

De acuerdo con los incrementos de presión, la densidad se calculó aplicando la ecuación de estado del gas ideal (Çengel *et al.*, 2006):

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde

$\rho$  = Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>)

P = presión del aire en el neumático (psi)

R = Constante del gas (kJ/kg·K)

T = Temperatura del aire en el neumático (°C)

Tabla 10. Variación de la densidad respecto a la temperatura y presión.

<b>TEMPERATURA °C</b>	<b>PRESION MANOMÉTRICA (PSI)</b>	<b>DENSIDAD kg/m<sup>3</sup></b>
25	14.7	1.1844
25	30.00	3.5842
30	30.75	3.5860
35	31.49	3.5860
40	32.24	3.5860
45	32.99	3.5860
50	33.73	3.5860
55	34.48	3.5860
60	35.23	3.5860
65	35.97	3.5860
70	36.72	3.5860
75	37.47	3.5860
80	38.21	3.5860
85	38.96	3.5860
90	39.70	3.5860
95	40.45	3.5860
100	41.20	3.5860

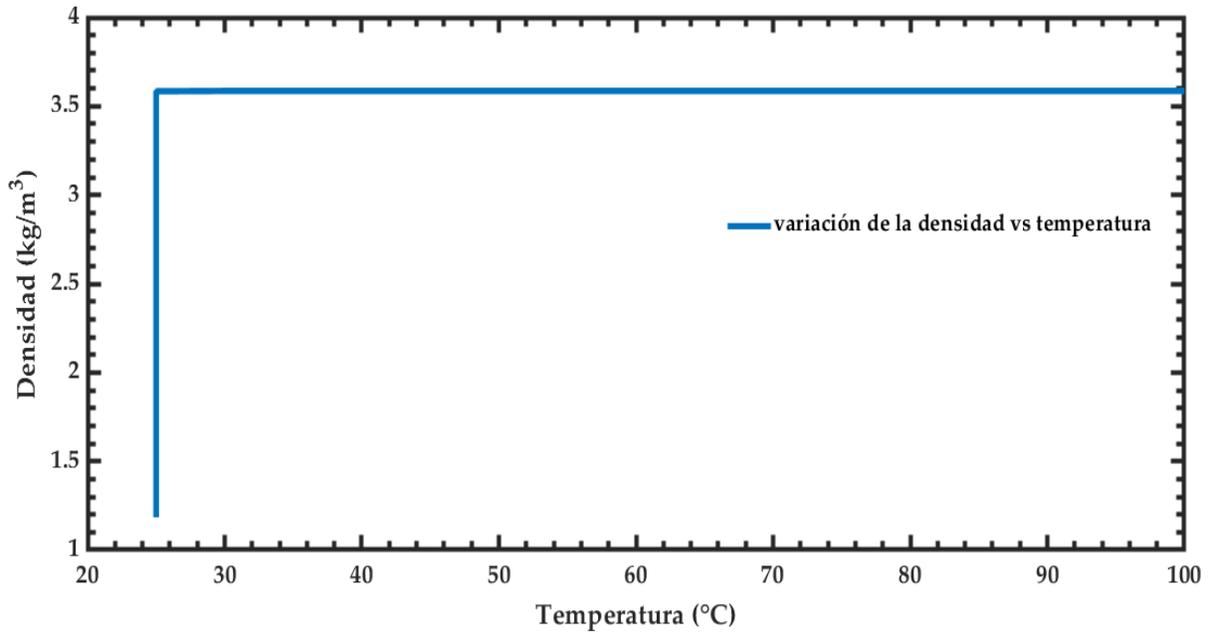


Figura 25. Densidad vs Temperatura en un neumático

Como se observa en la Figura 25, el cambio de presiones y temperatura no afecta significativamente la densidad del aire dentro del neumático, por lo que para efectos de simulación aplicando elementos finitos, puede considerarse igual para todos los casos de temperatura.

En el caso de la viscosidad si se aprecia variación de acuerdo a la Figura 26 obtenida a partir de la fórmula de viscosidad cinemática de los gases:

$$\mu = \frac{aT^{\frac{1}{2}}}{1 + \left(\frac{b}{T}\right)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dónde:

a y b: Son constantes que se determinan de forma experimental (Kg/(m·s·K<sup>1/2</sup>) y (K) respectivamente

$\mu$  = Viscosidad dinámica del aire (Kg/m·s)

T = temperatura absoluta (K) (Çengel *et al.*, 2006).

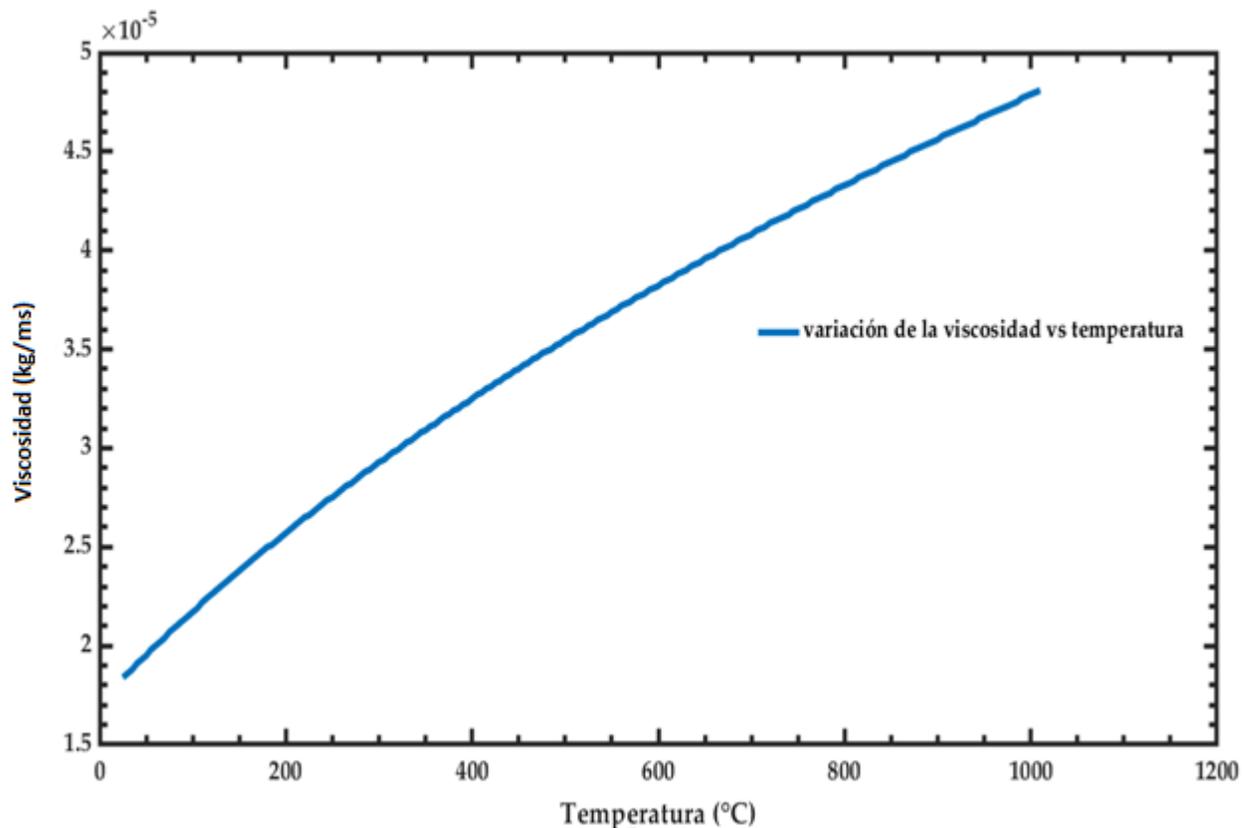


Figura 26. Viscosidad cinemática en el aire con respecto a los cambios en la temperatura

Tabla 11. Variación de la viscosidad con respecto a la temperatura del aire contenido en un neumático.

TEMPERATURA	VISCOSIDAD
	DINÁMICA (Kg/m·s)
25	1.83723E-05
30	1.86E-05
35	1.88E-05
40	1.91E-05
45	1.93E-05
50	1.95E-05
55	1.98E-05
60	2.00E-05
65	2.02E-05
70	2.04E-05
75	2.07E-05

80	2.09E-05
85	2.11E-05
90	2.13E-05
95	2.15E-05
100	2.17E-05

Puede apreciarse en la Tabla 11 un cambio en la viscosidad del aire conforme la temperatura aumenta, pero durante la simulación en análisis de elementos finitos en los resultados no se observó diferencia en la potencia entregada por el dispositivo, por lo que se consideró una viscosidad  $1.83 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$  de y densidad de  $3.5860 \text{ kg/m}^3$  constante para efectos de simulación.

#### 8.4 Cálculo de la resistencia de carga óptima

Para la correcta caracterización y modelado numérico del microgenerador se debe conectar una resistencia de carga entre sus electrodos superior e inferior Figura 27. Dicha resistencia se calcula con la siguiente ecuación (Kuang *et al.*, 2017).

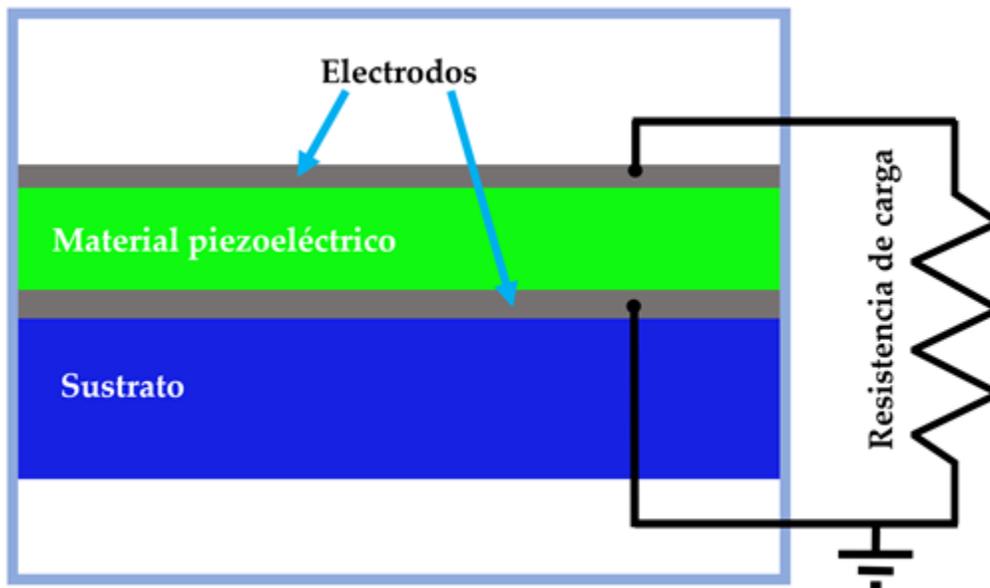


Figura 27. Esquemático donde se muestra la forma en que se debe conectar la resistencia de carga entre los electrodos del microgenerador.

$$R_{opt} = \frac{1}{2\pi fC_p}; \quad \text{(Ecuación 8)}$$

donde:

f = Frecuencia de excitación (Hz)

$C_p$  = Capacitancia de la película de ZnO (F)

luego la capacitancia de la película de ZnO se calcula mediante la ecuación

$$C_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{33} W L_e}{t_p}; \quad \text{(Ecuación 9)}$$

donde  $\epsilon_0$  y  $\epsilon_{33}$  son la permitividad del espacio libre y la constante de permitividad del ZnO, respectivamente.

$L_e$ , = Largo del electrodo (m)

W = Ancho (m)

$t_p$  = Espesor de la capa de ZnO (m)

## 9. Resultados

Tabla 12. Características del diseño propuesto

CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO PROPUESTO	
Frecuencia natural	1077.9 Hz
Resistencia de carga óptima	85.91 K $\Omega$
Potencia de generación a 1000 Hz	13 $\mu$ W
Esfuerzo máximo a 1000 Hz	200 MPa
Deflexión estática	0.33 $\mu$ m
Deformación total a 1000 Hz y 1000 m/s <sup>2</sup>	42.26 $\mu$ m

Los resultados arrojados por el análisis por computadora, se realizó la estimación del voltaje generado por el microdispositivo a diferentes frecuencias y aceleraciones. Se realizaron 10 iteraciones desde los 100 hasta 1000 m/s<sup>2</sup> de aceleración. Como se observa en la Figura 28, mientras se aumenta la frecuencia de vibración y la aceleración, también aumenta el voltaje generado en el microdispositivo.

Cabe mencionar que la gráfica indica los voltajes generados a diferentes aceleraciones encontrándose a circuito abierto. Para estimar la potencia se puede aplicar la fórmula para el cálculo de potencia de la ley de ohm y utilizando la resistencia de carga óptima:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (\text{Ecuación 10})$$

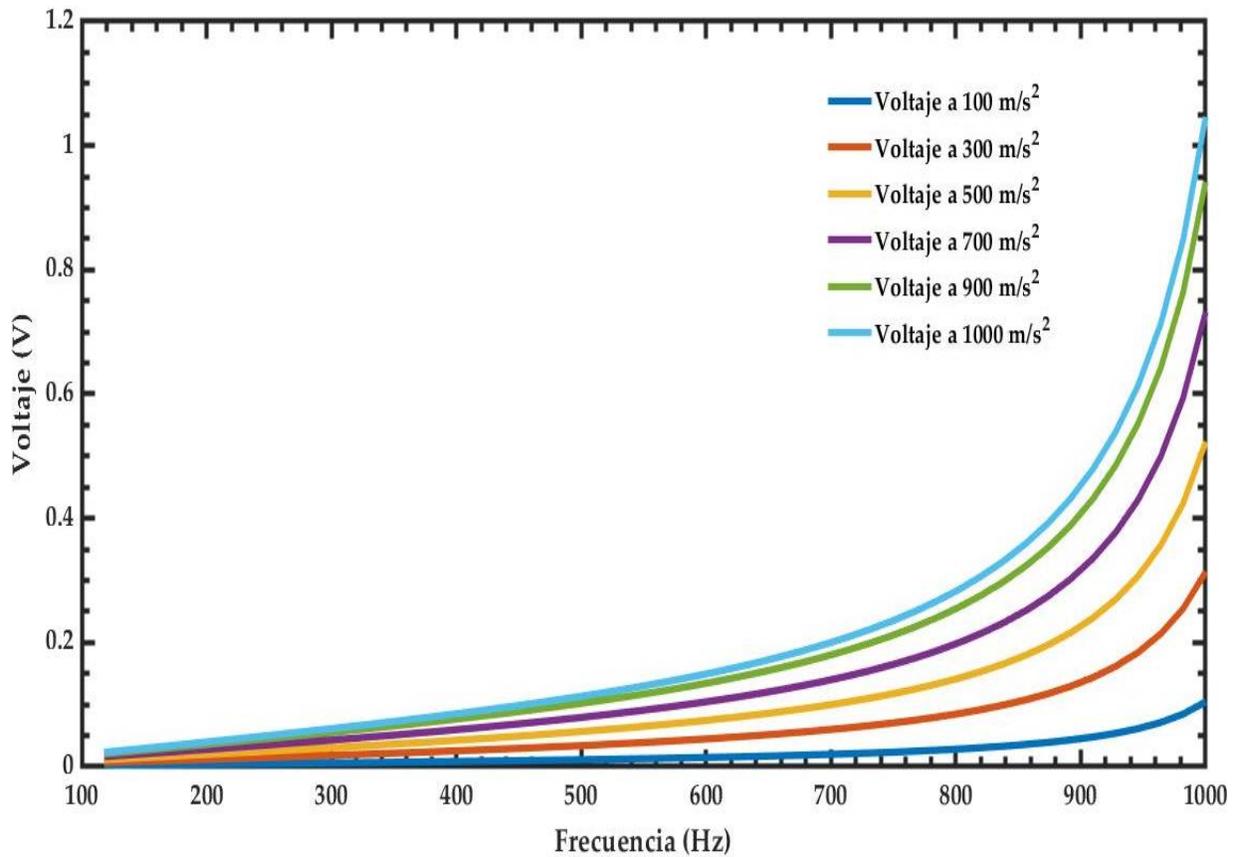
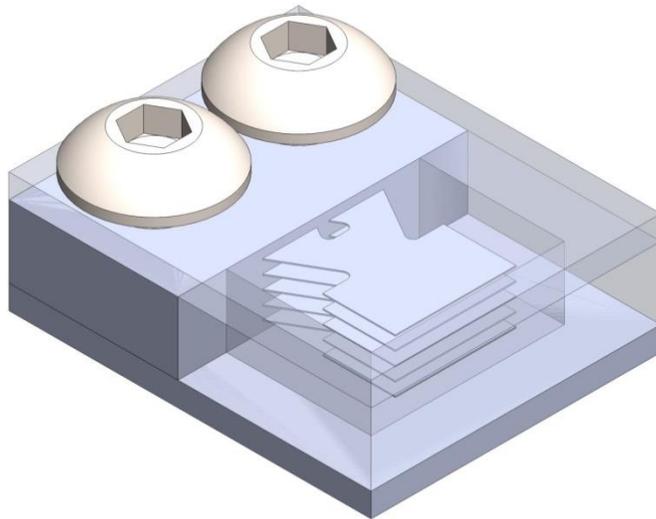
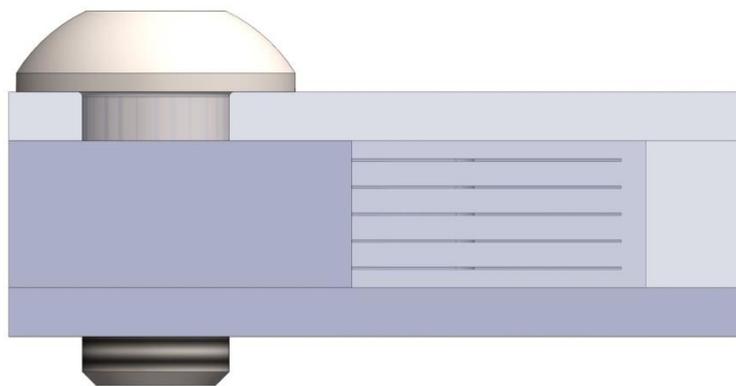


Figura 28. Gráfico de voltaje vs frecuencia de un microgenerador piezoeléctrico basado en óxido de zinc.

El gráfico anterior indica la potencia que se puede generar en una sola estructura, sin embargo, haciendo un arreglo de 5 microdispositivos interconectados entre sí, se puede lograr generar 65  $\mu\text{W}$  de potencia; quedando la estructura como se observa en las Figuras 29 y 30.



*Figura 29.* Encapsulado de una serie de microdispositivos piezoeléctricos.



*Figura 30.* Vista lateral del encapsulado de una serie de microdispositivos.

### 9.1 Resultados de Fase 3 análisis estadístico de datos.

Para cumplir con el OP3, tomando los datos obtenidos en el análisis de elementos finitos, se procedió a realizar una regresión lineal para obtener la ecuación del modelo. Se realizó una estimación del comportamiento del microdispositivo sometido a las diferentes frecuencias y aceleraciones que van desde los 100 hasta 1000 Hz y 100 m/s<sup>2</sup> hasta 1000 m/s<sup>2</sup> respectivamente.

Primeramente, se realizó la regresión lineal por el método numérico en el software estadístico IBM SPSS ® V25 para obtener una ecuación característica de cada curva presentada en la Figura 27, identificando un ajuste logarítmico del comportamiento del microgenerador en cuanto a producción de voltaje. Para todos los casos de prueba se tiene la misma correlación de datos.

Se obtuvo por cada regresión lineal una R<sup>2</sup> de 0.688 y una R de 0.833.

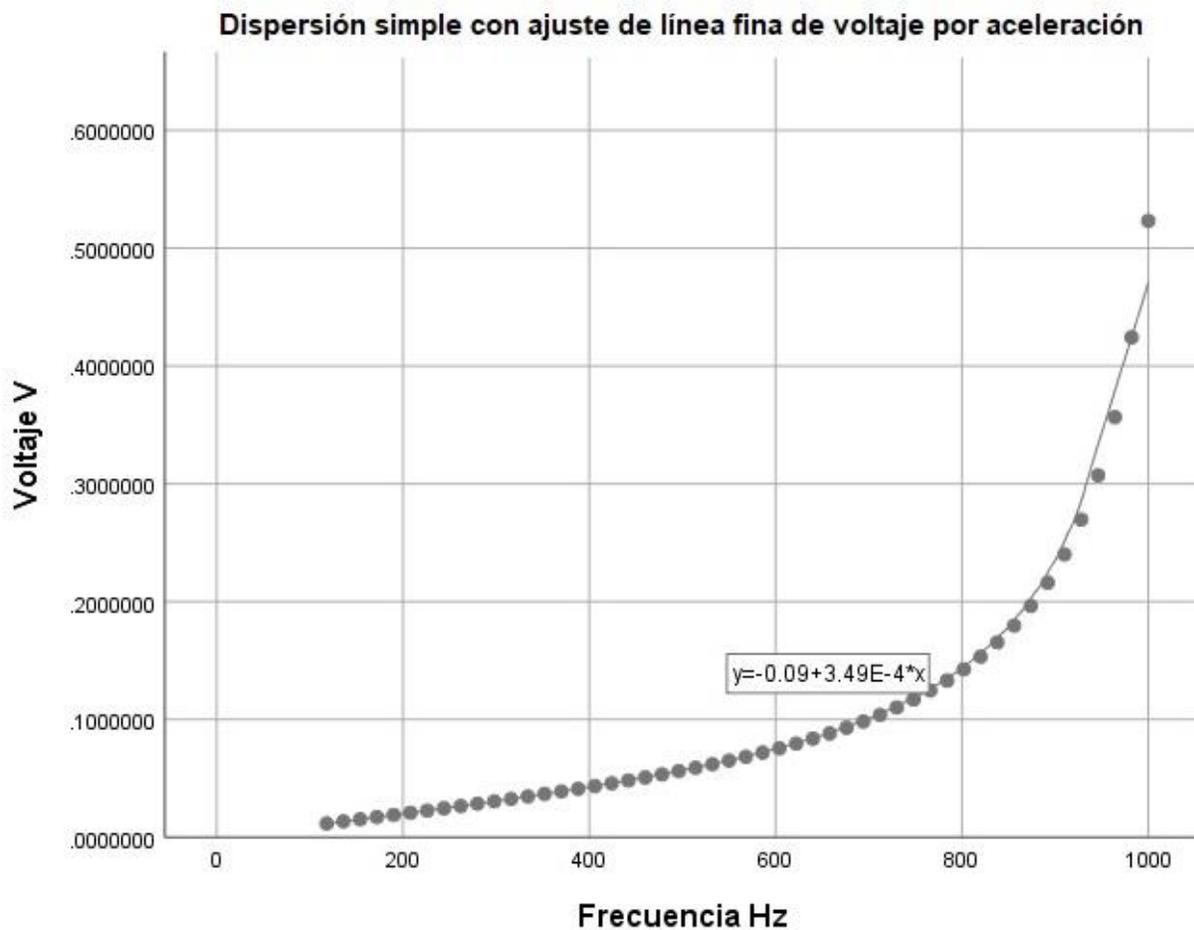


Figura 31. Regresión lineal de los datos de aceleración media.

Aplicando regresión lineal para cada una de las gráficas obtenidas se obtuvieron las siguientes ecuaciones para cada aceleración simulada; Siendo X el valor de frecuencia que se debe sustituir en la ecuación:

Tabla 13. Ecuaciones obtenidas aplicando regresión lineal a los diferentes conjuntos de datos.

<b>ACELERACIÓN</b>	<b>ECUACIÓN PARA ESTIMAR EL VOLTAJE A DIFERENTES ACELERACIONES</b>
100 m/s <sup>2</sup>	$y = -0.02 + 6.98 \text{ E-}5 * x$
300 m/s <sup>2</sup>	$y = -0.05 + 2.09 \text{ E-}4 * x$
500 m/s <sup>2</sup>	$y = -0.09 + 3.49 \text{ E-}4 * x$
700 m/s <sup>2</sup>	$y = -0.12 + 4.89 \text{ E-}4 * x$
900 m/s <sup>2</sup>	$y = -0.16 + 6.28 \text{ E-}4 * x$
1000 m/s <sup>2</sup>	$y = -0.18 + 6.98 \text{ E-}4 * x$

Cabe mencionar que cada una de las ecuaciones presentadas en la Tabla 13 sirven para hacer una estimación del voltaje que el microdispositivo genera dependiendo de la aceleración a la cual esté sometido.

Así mismo se hizo una prueba para determinar si existen diferencias significativas sometiendo el microdispositivo a diferentes aceleraciones, obteniendo los siguientes resultados:

Para estimar el total de datos obtenidos, se procedió a multiplicar 50 observaciones por 6 factores de aceleración, teniendo como resultado un total de 300 datos, mismos a los que se les aplicó el teorema de límite central, por lo que asumimos que tenemos una distribución normal.

Los 300 datos antes mencionados fueron sometidos a pruebas de bondad de ajuste para saber si se aplicaban pruebas paramétricas de comparación de medias o no paramétricas. Después de realizar las pruebas de normalidad y homocedasticidad, se decidió llevar a cabo la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparación de medias al no cumplirse los supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas. Todas las pruebas se realizaron con un I.C. del 95% y un  $\alpha = 0.05$ .

A continuación, se muestran las pruebas estadísticas aplicadas:

- 1) Prueba de normalidad aplicando Kolmogorov - Smirnov

Aplicando las pruebas estadísticas a través del software estadístico antes mencionado, se encontró como resultado un valor de  $p = 0.000$  ( $1.81 \times 10^{-41}$ ), que se puede observar en la Tabla 14.

Tabla 14. Prueba Kolmogorov Smirnov calculada en IBM SPSS

Prueba Kolmogorov-Smirnov		
VOLTAJE		
N		300
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Mean	0.1240895258
	Desviación std.	0.15995109684
Diferencias Máximas	Absoluta	0.223
Extremas	Positiva	0.205
	Negativa	-0.223
Estadístico de prueba		0.223
Asymp. Sig. (2-tailed)		.000 <sup>c</sup>

a. La distribución de la prueba es normal.

b. Calculado a partir de los datos.

c. Corrección de importancia de Lilliefors.

Para la prueba se consideró como hipótesis estadística:

$H_0$  = La distribución sigue una distribución normal

$H_1$  = La distribución difiere de la distribución normal

Decisión

$H_0 = p < \alpha$ ; en el resultado obtuvimos que  $p = 1.81 \times 10^{-41} < 0.05$  por lo tanto la distribución difiere de una distribución normal de datos. Posteriormente se realizó la prueba de Levene.

La prueba de Levene se utilizó para evaluar la homogeneidad de las varianzas, dando como resultado del análisis estadístico la siguiente tabla:

Tabla 15. Prueba de homogeneidad de varianzas calculada en SPSS.

<b>Test de homogeneidad de varianzas</b>					
		Estadístico			
		de Levene	df1	df2	Sig.
VOLTAJE	Basada en la media	14.492	5	294	0.000
	Basada en la mediana	7.944	5	294	0.000
	Basado en la mediana y con df ajustado	7.944	5	174.947	0.000
	Basado en la media recortada	11.268	5	294	0.000

En esta prueba se plantearon las siguientes hipótesis estadísticas:

Ho = Las varianzas son homogéneas

H1 = Las varianzas no son homogéneas (son diferentes)

Por lo tanto, de acuerdo a los valores obtenidos en la Tabla 15 se llegó a la siguiente toma de decisión:

El valor p dio un valor inferior a  $\alpha p = 1.07 \times 10^{-12} < 0.05$  Por lo tanto las varianzas no son homogéneas en el conjunto de datos. Luego entonces se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con post-hoc para la comparación de las medias.

### 9.1.1 Prueba de Kruskal-Wallis

Toda vez que no se cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se realizó el análisis de kruskall-Wallis mediante SPSS obteniendo la siguiente tabla de resultados:

Tabla 16. Prueba de Kruskal Wallis

Resumen de prueba de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de VOLTAJE (V) es la misma entre las categorías de ACELERACION (MS2).	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de .05.

En la Tabla 16 se observa que se tuvo un valor de significancia  $p = 0.000$ , concluyendo entonces a partir de las hipótesis estadísticas planteadas:

$H_0$  = Las medias de todos los grupos son iguales

$H_1$  = Al menos una media es diferente

Teniendo en cuenta que nuestro valor  $p = 0.00$ ; se aceptó la hipótesis alterna que dice que al menos una media es diferente; esto porque:

$H_1 = p < \alpha$ ; esto es  $0.000 < 0.05$

Cabe mencionar que automáticamente el software sugiere rechazar la hipótesis nula.

Para identificar cuáles factores eran diferentes, se recurrió a la prueba de post-hoc de agrupamiento de factores. Se identificó que, existen grupos en los que no existen diferencias significativas; esto quiere decir que los valores medios son iguales, por lo que los cambios de los resultados de aceleración vs voltaje son semejantes. Éste fenómeno puede observarse en la Figura 32.

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
100-300	-65.980	17.349	-3.803	.000	.002
100-500	-104.120	17.349	-6.001	.000	.000
100-700	-129.540	17.349	-7.467	.000	.000
100-900	-147.980	17.349	-8.529	.000	.000
100-1000	-155.500	17.349	-8.963	.000	.000
300-500	-38.140	17.349	-2.198	.028	.419
300-700	-63.560	17.349	-3.664	.000	.004
300-900	-82.000	17.349	-4.726	.000	.000
300-1000	-89.520	17.349	-5.160	.000	.000
500-700	-25.420	17.349	-1.465	.143	1.000
500-900	-43.860	17.349	-2.528	.011	.172
500-1000	-51.380	17.349	-2.961	.003	.046
700-900	-18.440	17.349	-1.063	.288	1.000
700-1000	-25.960	17.349	-1.496	.135	1.000
900-1000	-7.520	17.349	-.433	.665	1.000

Cada fila prueba la hipótesis nula de que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son las mismas.  
Se muestran las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es .05.

Figura 32. Resultado de grupos de datos con y sin diferencias significativas según análisis estadístico.

### 9.1.2 Prueba de POST-HOC

A partir de la prueba de Kruskal-Wallis se encontraron 4 grupos del factor aceleraciones que presentaron semejanzas, los cuales se demuestran en la Figura 33, donde se representan dichos grupos en un diagrama de caja y bigotes.

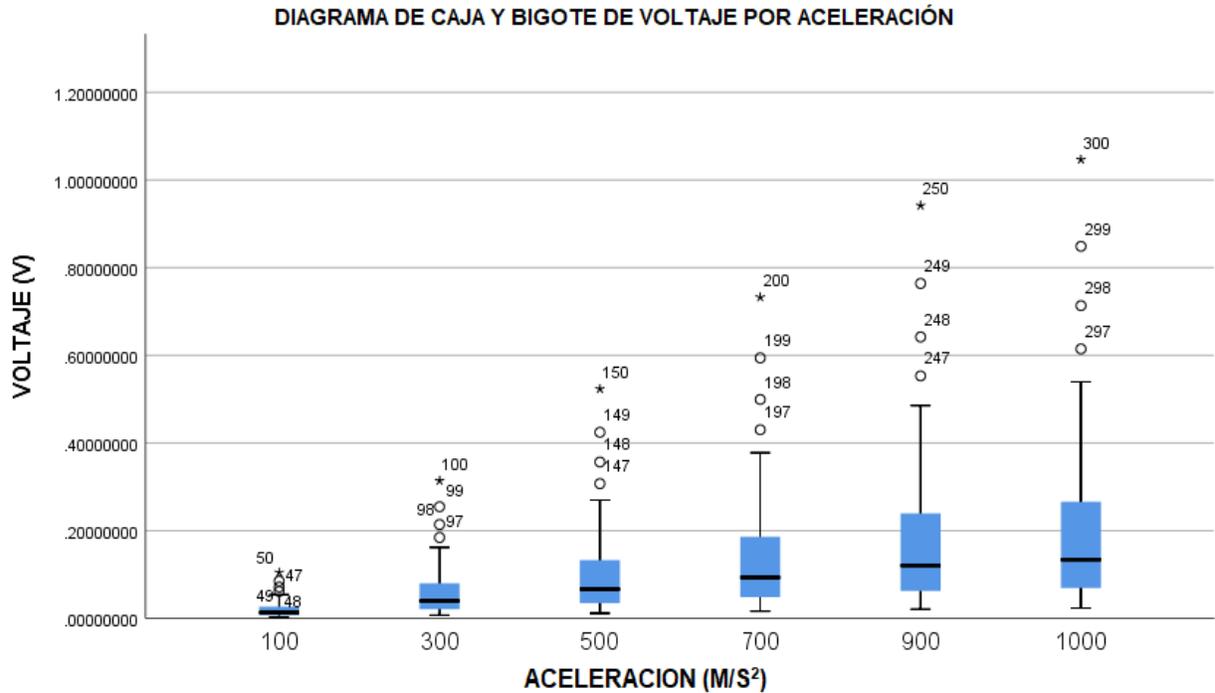


Figura 33 Diagrama de caja y bigote de voltaje vs aceleración

En la Figura 33 se aprecia que existen 4 grupos con semejanzas y en la parte de arriba fuera de las cajas se aprecian outliers, que son valores extremos que se encuentran muy por encima de la media; esto sucede porque el fenómeno tiene un comportamiento de tipo logarítmico.

Finalmente se obtuvo una tabla de resultados de la prueba Post-Hoc a través del software SPSS arrojando lo siguiente:

Tabla 17. Prueba de Post-Hoc

		VOLTAJE			
		Post-Hoc			
ACELERACION	N	Subconjunto para alpha = 0.05			
		1	2	3	4
100	5	0.021272489			
	0	2			
300	5	0.063817487	0.0638174876		
	0	6			
500	5		0.1063624640	0.1063624640	
	0				
700	5			0.1489074480	0.1489074480
	0				
900	5				0.1914523740
	0				

1000	5				0.2127248920
	0				
Sig.		0.692	0.692	0.692	0.248

Tabla 18. Estadísticas descriptivas

Estadísticas descriptivas						
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación std.	Varianza
VOLTAJE (V)	300	0.00232399	1.04632000	0.1240895258	0.15995109684	0.026
N	300					

De lo anterior se determina que existen 4 grupos de aceleraciones:

- a) GRUPO A DE 100 A 300 (M/S<sup>2</sup>)
- b) GRUPO B DE 300 A 500 (M/S<sup>2</sup>)
- c) GRUPO C DE 500 A 700 (M/S<sup>2</sup>)
- d) GRUPO D DE 700 A 1000 (M/S<sup>2</sup>)

De aquí se puede concluir que trabajando a partir de 700 m/s<sup>2</sup> se puede obtener el trabajo óptimo del microdispositivo. Es decir, los valores máximos de potencia se obtienen a partir de ésta aceleración.

## 10. Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, a través de un microdispositivo en arreglo simple, pudimos obtener una generación de potencia de 13  $\mu$ W, con lo que podemos cubrir la demanda mínima de potencia exigida para un sensor TPMS, de acuerdo con lo presentado en el 2013 donde Wang explicó que para un sensor de éste tipo es necesario suministrar al menos 7  $\mu$ W de potencia (Wang *et al.*, 2013)

Por otra parte, la geometría del microdispositivo presentado tiene también la ventaja de ser de fácil fabricación debido a que tiene menor cantidad de capas, a diferencia del presentado por Deng (Deng *et al.*, 2019) donde añadió sobre un sustrato dos electrodos y una masa sísmica, lo cual se vuelve un proceso laborioso aplicando 4 depósitos de material sobre el sustrato.

Por otra parte, en este trabajo requiere únicamente dos depósitos de material “óxido de zinc y un electrodo superior”, sin masa sísmica, con lo que se logra disminuir el tiempo y dificultad del

proceso de depósito y evitamos la necesidad de añadir masa sísmica, ya que las dimensiones de la parte superior del microdispositivo permiten que se concentre mayor cantidad de material y haría la función de la masa.

Además, se tiene una ventaja gracias a las dimensiones de diseño para el microgenerador, mismas que permiten interconectar dentro de un encapsulado varios microgeneradores para lograr obtener una mayor entrega de energía a diferencia de otros trabajos publicados anteriormente, donde se han fabricado microdispositivos de grandes dimensiones como en el caso de Mak, donde se observa un microdispositivo reportado de grandes dimensiones montado al centro de la rueda del automóvil (Mak *et al.*, 2013), con el cuál se ve comprometida la estética del mismo.

Hemos recomendado realizar un arreglo en escalera de 5 microdispositivos interconectados en un mismo encapsulado para lograr una potencia de generación de hasta 65  $\mu\text{W}$ .

Aprovechando el uso de un encapsulado para realizar arreglos de microdispositivos podría incluso encapsularse la instalación de la serie de dispositivos al vacío. Con esto se logra reducir el amortiguamiento propiciado por el aire, logrando una mayor flexión en las estructuras vibrantes.

## **11. Conclusiones**

Es posible utilizar microgeneradores piezoeléctricos basados en óxido de zinc para obtener potencias eléctricas en el orden de los  $\mu\text{W}$ , para poder cubrir la demanda de los requerimientos de los sensores a energizar, en este caso enfocándose en los sensores TPMS, mediante el análisis de elemento finito se demuestra que es posible la aplicación, teniendo en cuenta que el microdispositivo debe operar fuera de resonancia y que debe soportar aceleraciones aleatorias y de magnitudes elevadas.

Así mismo, para lograr cumplir con la demanda de energía para un sensor TPMS disponible en el mercado, puede utilizarse un arreglo de varios microdispositivos interconectados en paralelo, de modo que la operación continua de cada uno de ellos añada potencia y se logren alcanzar los parámetros exigidos por el sensor.

Por otra parte, de acuerdo a los resultados obtenidos por la simulación y análisis estadísticos, con la potencia de generación obtenida podemos aceptar parcialmente la hipótesis, ya que el microgenerador piezoeléctrico produce suficiente potencia eléctrica como para cubrir la demanda energética de un sensor.

Por lo tanto, ya que se llegaron a los resultados esperados se concluye que, no se rechaza la hipótesis planteada, que dice que usando óxido de zinc como material piezoeléctrico en la fabricación de microgeneradores, se puede transformar la energía cinética de las vibraciones mecánicas generadas por un neumático automotriz en energía eléctrica en el orden de  $\mu\text{W}$ .

Todavía cabe señalar que, es posible implementar los microgeneradores piezoeléctricos en la aplicación automotriz de sensores TPMS, esto con el fin de minimizar la producción de desechos por pilas utilizadas en esta aplicación.

Por otro lado, durante la investigación se realizó una estancia en el Centro de Investigación en Química Aplicada, en Coahuila, Saltillo; donde se aprendieron las técnicas de fabricación de óxido de zinc, métodos de depósitos de película fina y caracterización de microdispositivos.

De los diferentes métodos de depósito que se utilizaron experimentalmente se observó que el método de spray pyrolysis fue el más seguro en cuanto a garantía de adherencia de material. Si se logra automatizar la cantidad de material que el aspersor emite, se podrían lograr depósitos con espesores de película controlados, lo que minimizaría el margen de error y la discrepancia entre los resultados del experimento físico vs el análisis por computadora.

Cabe mencionar que el microdispositivo fabricado para las pruebas físicas, fue un microdispositivo de geometría rectangular, para efectos de fabricación una geometría rectangular es más sencilla y se pudo comprobar que los efectos de la vibración provocando esfuerzos de deformación en la capa de óxido de zinc permiten convertir la energía presente en las vibraciones mecánicas a energía eléctrica.

Finalmente, en lo personal la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, presente en el campus ITBoca, aprendí que existe cada vez más la necesidad investigar métodos para resarcir los problemas de contaminación provocados por las actividades antropogénicas. Existen muchos daños que ya están comprobados y que se siguen investigando, por lo que tenemos trabajar cada vez más para desarrollar alternativas y generar aportes de carácter científico para dar soluciones a los problemas ya presentes.



## Literatura citada

- Afolayan, M. O., & Inalegwu, T. J. (2013). Recycling Piezo-Crystal Based Sounders from Small (Electronic) Devices into Energy Harvesting Devices. *Advanced Materials Research*, 824, 138-144. doi:10.4028/[www.scientific.net/amr.824.1](http://www.scientific.net/amr.824.1)
- Ambiente, S. d. M. (2018). Ponte pilas con tu ciudad. Retrieved from <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/ponte-pilas-con-tu-ciudad>
- Behroozinia, P., Taheri, S., & Mirzaeifar, R. (2018). An investigation of intelligent tires using multiscale modeling of cord-rubber composites. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 46(2), 168-183.
- Bhatt, G., Manoharan, K., Chauhan, P. S., & Bhattacharya, S. (2019). MEMS Sensors for Automotive Applications: A Review *Sensors for Automotive and Aerospace Applications* (pp. 223-239): Springer.
- Blom, F., Bouwstra, S., Elwenspoek, M., & Fluitman, J. (1992). Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 10(1), 19-26.
- Cao, Z., He, J., Wang, Q., Hara, M., Oguchi, H., & Kuwano, H. . (2013). High output power AlN vibration-driven energy harvesters. *Journal of Physics: Conference Series*, 476. doi:10.1088/1742-6596/476/1/012034
- Carbonari, R. C. (2003). *Projeto de atuadores piezelétricos flexionais usando o método de otimização topológica*. Universidade de São Paulo.
- Castells Xavier, R. A. C., Ana M. Andrés Payán, Aina Bruno, Jordi Bruno, Alvaro Marcelo Canales Rojas, Amparo Cortés Lucas, Gloria Díez Bernabé, Joan Feliubadaló Molins, Xavier Flotats Ripoll, Pere Fullana i Palmer, Jordi García Martínez, Maribel Herrero Municio, Lorena Jurado de Gracia. (2012). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos solidos urbanos y fangos de depuradora* (S. A. Ediciones Diaz de Santos Ed. Vol. 2). MADRID.
- Castro, J., & Díaz, M. L. (2004). La contaminación por pilas y baterías en México. *Gaceta ecológica*(72).
- Çengel, Y., Cimbala, V., & John, M. (2006). Fluid mechanics fundamentals and applications. *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. No. TA357. C, 4318, 2006.*
- Dahiya, R. S., & Valle, M. (2012). *Robotic tactile sensing: technologies and system*: Springer Science & Business Media.
- Deng, L., Qi, J., Fang, Y., Wang, D., Wu, B., & Wen, Z. (2019). Design and optimization of a trapezoidal beam array energy harvester with operating wide speed rang for TPMS application. *Microsystem Technologies*, 25(7), 2869-2879.
- Doménech, J., Pérez, D. G., Gras-Marti, A., Aranzabal, J. G., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., . . . Valdés, P. (2003). La enseñanza de la energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20(3), 285.
- Erturk, A., Bilgen, O., & Inman, D. J. (2008). Performance analysis of single crystal PMN-PZT unimorphs for piezoelectric energy harvesting. *ASME 2008 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. doi:10.1115/SMASIS2008-528
- Ghasemi-Nejhad, M. N., Pourjalali, S., Uyema, M., & Yousefpour, A. (2006). Finite element method for active vibration suppression of smart composite structures using piezoelectric materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(3), 309-352.
- Gu, L. (2011). Low-frequency piezoelectric energy harvesting prototype suitable for the MEMS implementation. *Microelectronics Journal*, 42(2), 277-282.

- Ju, S., Chae, S. H., Choi, Y., Jun, S., Park, S. M., Lee, S., ... & Ji, C. H. (2013). Harvesting energy from low frequency vibration using MSMA/MFC laminate composite. *Transducers & Eurosensors* 1348-1351. doi:10.1109/transducers.2013.6627027
- Jung, H. J., Song, Y., Hong, S. K., Yang, C. H., Hwang, S. J., Jeong, S. Y., & Sung, T. H. (2015). Design and optimization of piezoelectric impact-based micro wind energy harvester for wireless sensor network. *Sensors and Actuators A: Physical*, 222, 314-321.
- Kandler, M., Scheibenzuber, W., & Werner, M. (2019). Tire pressure monitoring system (tpms) module, system and method of acknowledging data transmissions for tpms: Google Patents.
- Kim, J., Park, S., Lim, W., Jang, J., Lee, T. H., Hong, S. K., . . . Sung, T. H. (2016). Design optimization of PZT-based piezoelectric cantilever beam by using computational experiments. *Journal of Electronic Materials*, 45(8), 3848-3858.
- Kuang, Y., Daniels, A., & Zhu, M. (2017). A sandwiched piezoelectric transducer with flex end-caps for energy harvesting in large force environments. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(34), 345501.
- Liu, X., Yu, L., Zheng, S., & Chang, J. (2018). Energy Harvesting in Tire: State-of-the-Art and Challenges. *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 11(2018-01-1119).
- Mak, K. H., McWilliam, S., & Popov, A. A. (2013). Piezoelectric energy harvesting for tyre pressure measurement applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(6), 842-852.
- Martínez, J., Mallo, M., Lucas, R., Alvarez, J., & Salvarrey, A. (2005). Guía para la gestión integral de residuos peligrosos: Fundamentos.
- Merino, L. (2007). Las energías renovables. *Madrid, España: Haya Comunicación*.
- Minazara, E., Vasic, D., & Costa, F. (2008). *Piezoelectric generator harvesting bike vibrations energy to supply portable devices*. Paper presented at the Proceedings of International Conference on Renewable Energies And Power Quality (ICREPQ'08).
- Moheimani, S. R., & Fleming, A. J. (2006). *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*: Springer Science & Business Media.
- Pan, C., Liu, Z., & Chen, Y. (2012). Study of broad bandwidth vibrational energy harvesting system with optimum thickness of PET substrate. *Current Applied Physics*, 12(3), 684-696.
- Ralib, A. A. M., Nordin, A. N., Salleh, H., & Othman, R. (2012). Fabrication of aluminium doped zinc oxide piezoelectric thin film on a silicon substrate for piezoelectric MEMS energy harvesters. *icrossystem technologies*, 18. doi:10.1007/s00542-012-1550-9
- Rodriguez, G. M. (2011). *Integration of resonant N/MEMS for energy harvesting from ambient vibrations*. (Doctoral dissertation), Universidad Autonoma de Barcelona.
- Salinas, J. M. C., & Mena, M. J. M. (2017). La disminución de la contaminación ambiental a través del encapsulamiento de pilas. Proyecto con estudiantes universitarios de Ecuador. *Roca: Revista Científico-Educaciones de la provincia de Granma*, 13(4), 301-311.
- Saravanakumar, B., & Kim, S. J. (2014). Growth of 2D ZnO nanowall for energy harvesting application. *The Journal of Physical Chemistry*, 8831-8836. doi:10.1021/jp502057p
- Sharapov, V. (2011). *Piezoceramic sensors*: Springer Science & Business Media.
- Singh, K. B., Sivaramakrishnan, S. V., & Parsons, A. W. (2017). Tire temperature predictive system and method: Google Patents.
- Song, H. C., Kumar, P., Maurya, D., Kang, M. G., Reynolds, W. T., Jeong, D. Y., ... & Priya, S. . (2017). Ultra-low resonant piezoelectric MEMS energy harvester with high power density. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(26), 1226-1234. doi:10.1109/JMEMS.2017.2728821
- Sugishita, T. (1998). Piezoelectric transducer: Google Patents.

- Tang, G., Yang, B., Liu, J., Xu, B., Zhu, H., & Yang, C. (2014). Development of high performance piezoelectric d33 mode MEMS vibration energy harvester based on PMN-PT single crystal thick film. *Sensors and Actuators A: Physical*, 150-155. doi:10.1016/j.sna.2013.11.007
- Wang, Z., Elfrink, R., Vullers, R., Van Acht, V., Tutelaers, M., Matova, S., . . . Van Schaijk, R. (2013). *Large power amplification of a piezoelectric energy harvester excited by random vibrations*. Paper presented at the 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS).
- Wei, S., Hu, H., & He, S. (2013). Modeling and experimental investigation of an impact-driven piezoelectric energy harvester from human motion. *Smart Materials and Structures*, 22(10), 8. doi:10.1088/0964-1726/22/10/105020
- Yang, Z., Zhou, S., Zu, J., & Inman, D. (2018). High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications. *Joule*, 2(4), 642-697.