



**UNIVERSIDAD UTE**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E  
INDUSTRIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**SIMULACIÓN DE LA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA DE UN  
SISTEMA ELECTRODINÁMICO CAPACITIVO MEDIANTE  
TRANSDUCTORES LVDT.**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**GUIDO JAVIER VELASCO CLEONARES**

**DIRECTOR: Lic. IVES TORRIENTE GARCÍA, MSc**

**Santo Domingo, Julio 2019**

© Universidad UTE. 2019  
Reservados todos los derechos de reproducción

## FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0924985229
APELLIDO Y NOMBRES:	Velasco Cleonares Guido Javier
DIRECCIÓN:	Urb. El Centenario
EMAIL:	<a href="mailto:javido07@hotmail.com">javido07@hotmail.com</a>
TELÉFONO FIJO:	022-767-493
TELÉFONO MÓVIL:	0960187716

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Simulación de la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT.
AUTOR:	Velasco Cleonares Guido Javier
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	23 de julio de 2019
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Lic. Ives Torriente García, MSc.
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Electromecánico.
RESUMEN: Mínimo 180 y máximo 250 palabras	En la investigación se realiza una simulación de la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT, considerando que los transeúntes generen el impulso mecánico en el material al caminar. El proceso investigativo estuvo marcado inicialmente por la revisión literaria científica de los elementos que sustentan el estudio de los materiales piezoeléctricos y su capacidad de generar energía eléctrica, todo esto se evidencia en un primer capítulo donde se establecen también los objetivos de la investigación. Ya con la idea clara, en un segundo capítulo se describe todos los aspectos metodológicos que se llevó a cabo para la simulación, se hace alusión a las

	<p>fórmulas y ecuaciones matemáticas que permiten medir la relación entre la energía eléctrica y las pisadas de las personas. Después de procesar toda la información se desarrolló un tercer capítulo donde es posible observar todos los resultados obtenidos en la investigación, también se muestran los resultados de la simulación y se compara con resultados obtenidos en investigaciones previas donde la dispersión no es superior a 0.7V para un margen de error de 6% en las dos pruebas realizadas. Ya terminando el informe están las principales conclusiones del proceso investigativo.</p>
<p><b>PALABRAS CLAVES:</b></p>	<p>Materiales Piezoeléctricos, Recolección de Energía, Mecánica, Transformación de energía.</p>

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.



f: \_\_\_\_\_  
**VELASCO CLEONARES GUIDO JAVIER**  
 C.I. 0924985229

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **VELASCO CLEONARES GUIDO JAVIER**, CI 0924985229 autor del proyecto titulado: **Simulación de la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTROMECAÁNICO** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Santo Domingo, 23 de julio de 2019

f:



---

VELASCO CLEONARES GUIDO JAVIER  
C.I. 0924985229

## CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor, certifico que el presente trabajo de titulación que lleva por título **Simulación de la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT**, para aspirar al título de **INGENIERO ELECTROMECAÁNICO** fue desarrollado por **VELASCO CLEONARES GUIDO JAVIER**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y que dicho trabajo cumple con las condiciones requeridas para ser sometido a las evaluación respectiva de acuerdo a la normativa interna de la Universidad UTE.



---

Lic. Ives Torriente García, MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO**

C.I. 1726990086

## **DEDICATORIA**

Primero agradeciendo a Dios por permitirme llegar hasta este punto fundamental de mi vida, dándome salud y fuerzas para lograr todos mis objetivos, con honradez y responsabilidad.

Dando gracias a todas las personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron desde el comienzo con todo su apoyo, velando siempre por mí. A mis padres y hermano ya que ellos fueron los que siempre me dieron fortaleza para seguir este arduo trabajo, firmes, y aconsejándome incondicionalmente en todo lo necesario. Con todo el cariño este logro es para ustedes.

Papá Segundo

Mamá María

Hermano Cristhian.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres ya que me han ido forjando como la persona que soy en estos momentos, muchos de mis logros son gracias a ellos ya que me motivaron constantemente para seguir luchando por este triunfo, ayudándome con buenas costumbres, disciplina y valores inculcados desde la casa para llegar a ser un excelente profesional.

También quisiera agradecer a mi director de tesis MSc. Ives Torriente, por su guía y constante paciencia al momento de impartir sus conocimientos hacia mí. y rectitud como docente me han guiado al desarrollo de este trabajo.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>RESUMEN</b>	1
<b>1.INTRODUCCIÓN</b>	2
1.1 LOS ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS Y EL EFECTO PIEZOELÉCTRICO	2
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS	4
1.2.1 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS	4
1.2.1.1 Materiales piezoeléctricos naturales	5
1.2.1.1.1 Materiales piezoeléctricos de cuarzo	5
1.2.1.1.2 Materiales piezoeléctricos de turmalina	6
1.2.1.1.3 Materiales piezoeléctricos sal de Rochelle	6
1.2.1.2 Materiales piezoeléctricos artificiales	7
1.3 PROPIEDADES DE LAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS Y SUS CONSTANTES	7
1.3.1 CONSTANTE PIEZOELÉCTRICA O DEFORMACIÓN	7
1.3.2 CONSTANTE DIELECTRICA	8
1.3.3 CONSTANTE PIEZOELÉCTRICA (G)	8
1.3.4 FACTOR DE CALIDAD MECÁNICO Y FACTOR DE DISIPACIÓN DIELECTRICO	8
1.3.5 LÍMITE DE TRACCIÓN DINÁMICO	9
1.3.6 TASA DE ENVEJECIMIENTO	9
1.4 APLICACIONES	9
<b>2. METODOLOGÍA</b>	16
2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.	16
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS	16
2.2.1 DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA	16
2.2.2 DETERMINACIÓN DE LA CARGA Y LA CORRIENTE	17
2.2.2.1 Determinación de la carga	17
2.2.2.2 Determinación de la corriente	18
2.3 IMPULSO MECÁNICO	19
2.4 MÉTODO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE CAMINAR	19
2.5 CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS APLICABLES AL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO PZT	20

2.6 TENSIÓN ELÉCTRICA POR DEFORMACIÓN	22
2.7 INTENSIDAD DE LA CORRIENTE	23
2.7.1 POTENCIA GENERADA	23
2.8 FUERZA APLICADA A LOS DISCOS PIEZOELÉCTRICOS	23
2.9 ÁREA EFECTIVA DE ACCIÓN DEL DISCO	24
2.10 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN	24
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>29</b>
3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	29
3.2 MEDICIONES OBTENIDAS	31
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>33</b>
4.1 CONCLUSIONES	33
4.2 RECOMENDACIONES	33
<b>BIBLIOGRAFÍAS</b>	<b>34</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>19</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1</b> Tipos de Transductores	12
<b>Tabla 2</b> Propiedades físicas y eléctricas de los materiales piezoeléctricos	22
<b>Tabla 3</b> Propiedades físicas y eléctricas de los materiales piezoeléctricos	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1</b> Estructura Cristalina del Cuarzo ( $\text{SiO}_4$ )	5
<b>Figura 2</b> Estructura Cristalina del Turmalina ( $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ )	6
<b>Figura 3</b> Fórmula Estructural de la Sal de Rochelle	6
<b>Figura 4</b> Fórmula Estructural de Difluoruro de	7
<b>Figura 5</b> Estructura general de un sistema de medida	11
<b>Figura 6</b> Polaridad de lámina piezoeléctrica	16
<b>Figura 7</b> Voladizo Triangular vista plana piezoeléctrico	17
<b>Figura 8</b> Esquema eléctrico general para la recolección de energía con el empleo de elementos piezoeléctricos	20
<b>Figura 9</b> Algoritmo generado para el desarrollo de la simulación	25
<b>Figura 10</b> Código generado para la implementación del algoritmo	27
<b>Figura 11</b> Interfaz de modelo simulado de generación de energía eléctrica	28
<b>Figura 12</b> Diálogo de simulación del sistema caso I	30
<b>Figura 13</b> Diálogo de simulación del sistema caso II	30
<b>Figura 14</b> Diálogo de simulación del sistema caso III	31
<b>Figura 15</b> Gráficas de contraste para cada material (Espesor eje X, vs Voltaje eje Y)	32

# ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO 1. INTERFAZ CON MEDICIÓN DE VARIABLES.....</b>	<b>38</b>
<b>ANEXO 2. INTERFAZ CON MEDICIÓN DE VARIABLES.....</b>	<b>38</b>

## RESUMEN

En la investigación se realiza una simulación de la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT, considerando que los transeúntes generen el impulso mecánico en el material al caminar. El proceso investigativo estuvo marcado inicialmente por la revisión literaria científica de los elementos que sustentan el estudio de los materiales piezoeléctricos y su capacidad de generar energía eléctrica, todo esto se evidencia en un primer capítulo donde se establecen también los objetivos de la investigación. Ya con la idea clara, en un segundo capítulo se describe todos los aspectos metodológicos que se llevó a cabo para la simulación, se hace alusión a las fórmulas y ecuaciones matemáticas que permiten medir la relación entre la energía eléctrica y las pisadas de las personas. Después de procesar toda la información se desarrolló un tercer capítulo donde es posible observar todos los resultados obtenidos en la investigación, también se muestran los resultados de la simulación y se compara con resultados obtenidos en investigaciones previas donde la dispersión no es superior a 0.7V para un margen de error de 6% en las dos pruebas realizadas. Ya terminando el informe están las principales conclusiones del proceso investigativo.

**Palabras Clave:** Materiales Piezoeléctricos, Recolección de Energía, Mecánica, Transformación de energía.

## **1. INTRODUCCIÓN**

# 1. INTRODUCCIÓN

Los problemas enfocados en la generación de energía renovable para un desarrollo sostenible requieren de profundización en el estudio de fuentes de energías alternativas. En el contexto actual la demanda de energía se incrementa a un ritmo significativo dado el crecimiento poblacional a nivel mundial y el desarrollo de la tecnología. La población mundial en el último siglo tuvo un crecimiento aproximado de 5,5 veces y el consumo de energía en 50 veces más, sobre todo en el uso de combustibles fósiles. (Bertinat, 2016, pág. 3). El uso de estos elementos deteriora el medioambiente, es necesario realizar búsquedas de energías alternativas para la preservación del planeta.

En el caso específico del Ecuador el gobierno de los últimos 10 años implementó algunas medidas para la captación de energía renovable a través del Plan Nacional del Buen Vivir, y se construyeron hidroeléctricas para la generación de energías renovables. (Escobar, 2017, pág. 26). Aun con las estrategias propuestas por el Gobierno Central para el cambio de la matriz productiva existe una alta demanda de energía en el país que requiere la necesidad de realizar estudios para incorporar nuevas fuentes de generación de energía renovable, dado que el gobierno estableció como política energética la reducción de los combustibles fósiles. (Escobar, 2017, pág. 29).

El criterio clave que se considera como situación problemática dentro del proyecto es la perspectiva que existe de recolección de la energía ambiental y convertirla en energía eléctrica (Pérez, 2018, pág. 19), además de poder identificar el rendimiento que se obtiene en el proceso de transformación energética. Para lograr este proceso se valora la utilización de materiales que generen energía a partir de la interacción con energías ambientales, por lo que se consideró el estudio de los materiales piezoeléctricos debido a la factibilidad para generar electricidad partiendo de la energía mecánica.

## 1.1 LOS ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS Y EL EFECTO PIEZOELÉCTRICO

El estudio de materiales que generan señales eléctricas a partir de esfuerzos mecánicos data de finales del siglo XIX. Los primeros en descubrir y estudiar el efecto piezoeléctrico fueron los hermanos Curie. Considerando sus experiencias asociadas al estudio de las estructuras cristalinas subyacentes que dieron origen a la piroelectricidad, pudieron predecir el comportamiento del cristal, y demostraron el efecto utilizando cristales de turmalina, cuarzo, topacio, caña de azúcar, y sal de Rochelle. Siendo el cuarzo y la sal de Rochelle quienes exhibieron la mayor parte de propiedades piezoeléctricas (Venet, 2004).

El efecto piezoeléctrico surge cuando una fuerza aplicada, es capaz de deformar un material piezoeléctrico y éste a su vez es capaz presentar en sus caras una diferencia de potencial. Un potencial que podría aplicarse a dispositivos que basen su funcionamiento en la electricidad (Vicioli, 2009) El desarrollo de aplicaciones para los materiales piezoeléctricos condujo al descubrimiento de materiales ferroeléctricos; materiales que ostentaban propiedades piezoeléctricas superiores a las presentadas por los cristales naturales (Mateu & Moll, 2005).

A raíz del descubrimiento de los materiales ferroeléctricos vino la aparición de soluciones sólidas de Titanato de Zirconato de Plomo que se caracterizan por tener grandes coeficientes piezoeléctricos y electromecánicos. Las aplicaciones tecnológicas para estos materiales tuvieron grandes avances de forma muy rápida. Se creó una tendencia en todos los dispositivos utilizados en conversión de energía electromecánica a implementar como transductores a las cerámicas piezoeléctricas, quedando los piezoeléctricos clásicos para aplicaciones concretas y muy relacionadas con patrones de tiempo, filtros de banda muy estrecha (Jimenez B. , 2006)

Según (Perez & Velásquez , 2016) hacen referencia al desarrollo de los materiales piezoeléctricos en los últimos años las siguientes fechas, donde se marcó un avance en las investigaciones de estos temas. En el 2004 empleando transductores piezoeléctricos alineados en la suela de un zapato James Graham y Thaddeus Jusczyk lograron obtener 8.4 mW por el impacto del pie; en el 2008 en Japón se colocaron baldosas piezoeléctricas en algunas estaciones del metro de Tokio, que generan hasta 10 watt por segundo; en el 2011 se instalaron piezoeléctricos en el estadio Santiago Bernabéu de Madrid, para generar 8 mil 400 watt/segundo; en 2012 en Holanda se desarrollaron pistas de baile sostenibles, donde los sistemas instalados generan electricidad por medio de energía cinética (Bronder, 2018). En el caso del Ecuador el físico Carlos Duque diseñó un prototipo de plataforma flotante para obtener energía eléctrica a partir de la energía mecánica de las olas utilizando materiales piezoeléctricos. (Comercio, 2009)

Se puede resumir haciendo alusión a que la propiedad que tienen algunas sustancias cristalinas no conductoras de la corriente eléctrica de presentar cargas eléctricas producto de una deformación mecánica se conoce como piezoelectricidad (Venet, 2004) A su vez el efecto piezoeléctrico es la capacidad de ciertos materiales (minerales, cerámicas y algunos polímeros) para producir una carga eléctrica como respuesta a un esfuerzo mecánico aplicado. Dicho efecto tiene lugar si la deformación elástica del sólido es acompañada por una distorsión asimétrica de la distribución de las cargas

positivas y negativas, de manera que se induce un momento dipolar total; es decir, que el sólido se polariza (Mateu & Moll, 2005)

## **1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS**

En análisis de las características de los materiales piezoeléctricos se parte de que cuando se tiene un material capaz de presentar una polarización en sus caras es considerado un material piezoeléctrico (Venet, 2004). La polarización del material ocurre en la estructura cristalina que lo compone; se trata de un momento dipolar, que según (Vicioli, 2009, pág. 24) se define como: “ $(\mu)$  y que surge a partir de la existencia de dos partículas cargadas,  $(+q)$   $(-q)$ , ubicadas en dos puntos distintos del espacio; y que matemáticamente se define como el producto de la carga por la distancia que las separa. Por tanto,  $\mu$  es una magnitud dirigida. Se trata de una cantidad vectorial que gráficamente se representa por una flecha originada en la carga negativa.” Esto se traduce al fenómeno de polarización del material.

Un material con características piezoeléctricas naturales es aquellos que: “Cuando se aplica un esfuerzo, la suma de los desplazamientos de carga tiene una resultante que se traducirá al efecto piezoeléctrico.” (Venet, 2004, pág. 11). En el caso de los materiales con características piezoeléctricas artificiales se hace referencia a un material forzado a exhibir esas propiedades. Particularmente el material que cumple con estos criterios es la cerámica piezoeléctrica, y se configura previo al proceso de fabricación, los dipolos no muestran preferencia por alguna dirección en particular; en el material cerámico están orientados al azar. Siendo así, cuando se aplica un esfuerzo, la suma de los desplazamientos de carga es igual a cero tal que bajo estas condiciones el material no exhibirá propiedades piezoeléctricas (Perez & Velásquez, 2016).

### **1.2.1 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS**

Los materiales piezoeléctricos son estructuras cristalinas naturales o artificiales que son asimétricas con relación a su centro. Se les suele agrupar según diversas investigaciones en dos grandes grupos:

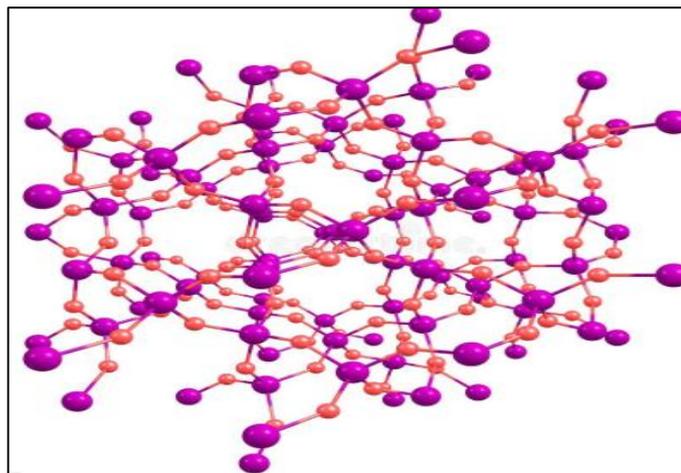
-  Cristales piezoeléctricos naturales
-  Cristales piezoeléctricos artificiales.

### 1.2.1.1 Materiales piezoeléctricos naturales

Los materiales cristalinos que no poseen centro de simetría y que son encontrados en la naturaleza, se conocen como piezoeléctricos naturales; sus propiedades piezoeléctricas exhibidas yacen intrínsecas (Perez & Velásquez , 2016). Los materiales piezoeléctricos naturales más comunes son el cuarzo, la turmalina, y la sal de Rochelle (Jimenez B. , 2006).

#### 1.2.1.1.1 Materiales piezoeléctricos de cuarzo

Los cristales completos de cuarzo pertenecen a los silicatos y tienen un corte hexagonal con terminaciones en punta. Se asocian tres conjuntos de ejes con un cristal: óptico, eléctrico y mecánico. El eje longitudinal que une las puntas al final se los cristales se llama el eje Z u óptico. El eje X o eléctrico, pasa diagonalmente a través de las esquinas opuestas del hexágono. El eje que es perpendicular a las caras del cristal es el eje Y o mecánico (Jimenez B. , 2006).

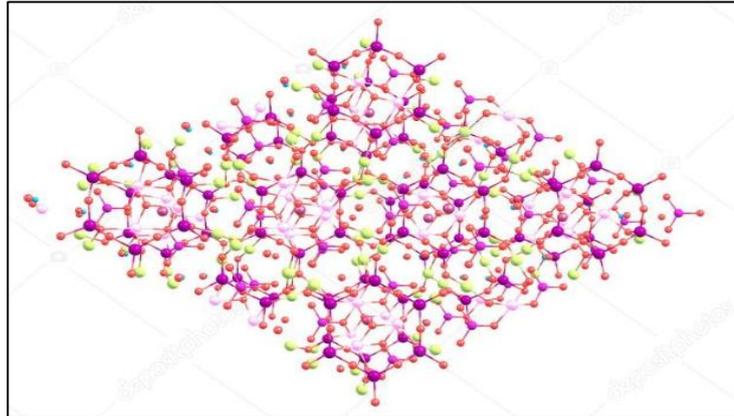


**Figura 1** Estructura Cristalina del Cuarzo (SiO<sub>4</sub>)  
www.sp.depositphotos.com (2019)

Si se corta del cristal una sección delgada y plana de tal forma que los lados planos sean perpendiculares a un eje eléctrico, los esfuerzos mecánicos a lo largo del eje Y producirán cargas eléctricas en los lados planos. Como la fuerza mecánica de deformación cambia de la compresión a la tensión, y viceversa, se invierte la polaridad de la carga. De forma contraria, si una carga eléctrica alterna se coloca en los lados planos, se produce una vibración mecánica a lo largo del eje Y. Esto es el efecto piezoeléctrico y también se presenta cuando se aplican fuerzas mecánicas a lo largo de las caras de un cristal cortado con sus lados planos perpendiculares al eje Y (Booth, 2017). En el presente trabajo se estudia el cuarzo como alternativa de material piezoeléctrico natural.

### 1.2.1.1.2 Materiales piezoeléctricos de turmalina

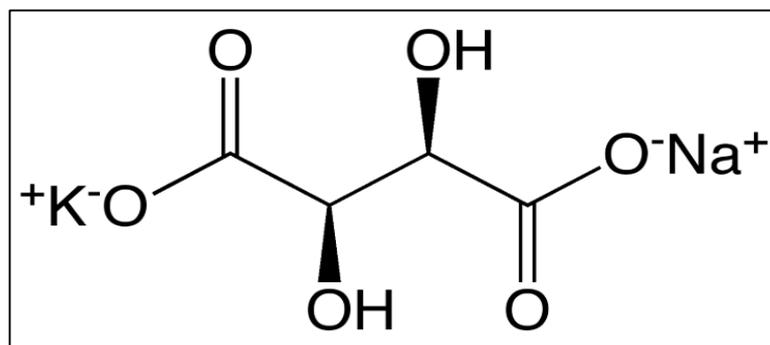
En el caso de la turmalina pertenece a la clase de los silicatos/ciclo silicatos; su cristalización se evidencia en el sistema trigonal, normalmente tienen un aspecto de columna alargada con un estiramiento vertical característico en las caras del prisma y con formas de triángulos esféricos en las secciones transversales. Los cristales de turmalina adquieren polaridad al ser sometidos, al igual que el cristal de cuarzo, a tensiones y compresiones mecánicas (Pascual, 2008).



**Figura 2** Estructura Cristalina del Turmalina (Si6O18)  
www.es.dreamstime.com (2019)

### 1.2.1.1.3 Materiales piezoeléctricos sal de Rochelle

Es un material descubierto en 1675 por Pierre Seignette, farmacéutico de la ciudad de Rochelle (Francia). Es soluble en agua y cristaliza en los prismas con forma de rombo y su composición es  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . (Pascual, 2008). También es conocida como sal de potasio y de sodio del ácido tartárico, los efectos piezoeléctricos de este material son comúnmente conocido como efecto piroelectricidad.

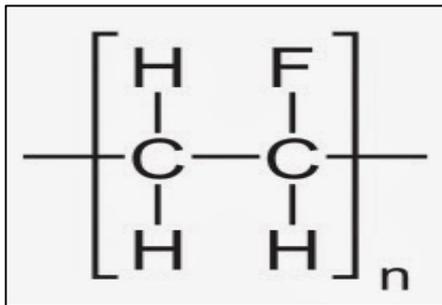


**Figura 3** Fórmula Estructural de la Sal de Rochelle  
( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )  
www.wikipedia.org (2019)

### 1.2.1.2 Materiales piezoeléctricos artificiales

Son los materiales que en su estado natural no manifiestan características piezoeléctricas, pero al ser sometido a la interacción con agentes externos a su estructura natural manifiestan la propiedad piezoeléctrica, ejemplo de los mismos son los cerámicos y los polímeros. Actualmente los materiales más utilizados dentro materiales piezoeléctricos sintéticos cerámicos son el Titanato de Plomo, Titanato de Bario, Titanato Zirconato de Plomo, Titanato Zirconato de Plomo y Lantano y el Niobato de Plomo y Magnesio (Perez & Velásquez , 2016).

Por otra parte, además del grupo de los cristales y cerámicos, sintéticos, piezoeléctricos, se conecta un tercer grupo que presenta la misma serie de propiedades piezoeléctricas, se trata del grupo de los polímeros. En el mercado los que se suelen comercializar son el Difluoruro de Polivinilo (PVDF) y sus copolímeros con Trifluoroetileno y Tetratrufluoroetileno. En el presente trabajo de los sintéticos se selecciona para el estudio el PVDF, el PZT y PSMNZT.



**Figura 4** Fórmula Estructural de Difluoruro de Polivinilo (PVDF)  
www.wikipedia.org (2019)

## 1.3 PROPIEDADES DE LAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS Y SUS CONSTANTES

### 1.3.1 CONSTANTE PIEZOELÉCTRICA O DEFORMACIÓN

Las constantes piezoeléctricas determinar la relación proporcional entre la generación de cargas y la tensión mecánica aplicada (efecto piezoeléctrico directo) y entre la deformación y el campo eléctrico aplicado (efecto piezoeléctrico inverso) (Pereira, 2010). A continuación, se indican las ecuaciones para determinar la constante piezoeléctrica:

$$D_i = \frac{\partial D_n}{\partial T_i} \left( \frac{C}{N} \right) \text{ si } (E, \theta) \quad (1)$$

$$D_i = \frac{\partial X_n}{\partial E_i} \left( \frac{M}{V} \right) \text{ si } (T, \theta) \quad (2)$$

Donde:

Di: Constante piezoeléctrica

Dn: Generación de Cargas (Coulomb)

Ti= Tensión Mecánica Aplicada (Newton)

Xn: Deformación (Metros)

Ei: Campo Eléctrico aplicado (C/N)

### 1.3.2 CONSTANTE DIELECTRICA

Se utiliza para definir la proporcionalidad entre el deslizamiento eléctrico y el campo eléctrico aplicado. Las constantes dieléctricas son importantes porque determinan la capacitancia de la cerámica piezoeléctrica (Pereira, 2010). Esta constante se mide a partir de la permisibilidad eléctrica ( $\epsilon$ ), en la ecuación que se muestra a continuación se indica el diferencial para determinar la permisibilidad eléctrica:

$$\epsilon = \frac{\partial Dn}{\partial Ei} \left( \frac{C}{N} \right) \text{ si } (T, \theta) \quad (3)$$

Donde:

$\epsilon$ : Constante dieléctrica (Permisibilidad)

Dn: Generación de Cargas (Coulomb)

Ei: Campo Eléctrico aplicado (C/N)

### 1.3.3 CONSTANTE PIEZOELÉCTRICA (G)

Definidas como la razón entre las constantes D y  $\epsilon$ , correlacionan la respuesta en tensión eléctrica del material a una tensión mecánica aplicada (de dimensión Vm/N) (Pereira, 2010).

$$g = \frac{D}{\epsilon} \left( \frac{Vm}{N} \right) \text{ si } (T, \theta) \quad (4)$$

### 1.3.4 FACTOR DE CALIDAD MECÁNICO Y FACTOR DE DISIPACIÓN DIELECTRICO

Ambas constantes determinan cuáles serán las pérdidas de energía del proceso de transducción. Por lo tanto con estos factores se determina si el material es adecuado para aplicaciones de potencia tales como los sistemas de limpieza por ultrasonido (Pereira, 2010).

### **1.3.5 LÍMITE DE TRACCIÓN DINÁMICO**

Es la cota máxima de tracción a la que el material puede ser sometido dinámicamente sin romperse (Pereira, 2010).

### **1.3.6 TASA DE ENVEJECIMIENTO**

Es la tasa con que las propiedades piezoeléctricas del material se alteran con el tiempo a medida que la orientación de los dominios de dipolos, creada por el proceso de polarización, desaparece (Pereira, 2010).

## **1.4 APLICACIONES**

Lograr la conversión eficiente de energía mecánica en energía eléctrica, utilizando materiales piezoeléctricos, es muy favorable y tiene diversas aplicaciones y el desarrollo de los avances tecnológicos actualiza y fortalece continuamente la utilización de estos materiales.

En el sector de la ingeniería mecánica se utilizan piezoactuadores para la cancelación de vibración, herramientas de posicionamiento, abrazaderas, cuñas, amortiguación, generación de vibraciones sónicas o ultrasónicas

El uso de sensores piezoeléctricos toma cada día más importancia en la industria automotriz. Actualmente, los sensores de retroceso (reversa) ayudan en las acciones de maniobra y estacionamiento; los giroscopios registran movimientos críticos del vehículo y activa modernos sistemas de estabilización. Los sensores piezocerámicos de golpe han tenido gran éxito en la industria automotriz. Estos permiten monitorear sensiblemente la vibración del motor e informar del cambio más mínimo.

En la industria normalmente se emplean los sensores piezoeléctricos para la medición de presión en centrales hidráulicas, bastidores, tanques de gas. Otras aplicaciones en la industria son:

- ✚ Filtros de ondas. Limitan la frecuencia de operación de las redes eléctricas.
- ✚ Hidrófonos. Las cerámicas piezoeléctricas tienen la propiedad de recepción de ondas sonoras en agua u otros líquidos con propiedades similares.
- ✚ Micrófonos ultrasónicos. La recepción de ondas de ultrasonido los hace importantes en la fabricación de diversos equipos, por ejemplo, controles remotos de equipamientos electrodomésticos.

Una de las aplicaciones más difundidas de cristales piezoeléctricos son los encendedores electrónicos. En su interior llevan un cristal piezoeléctrico que al ser golpeado de forma brusca por el mecanismo de encendido provoca una elevada concentración de carga eléctrica, capaz de crear un arco voltaico o chispa que encenderá el mechero.

Otras aplicaciones médicas que emplean la tecnología piezocerámica en la medicina son:

- ✚ Marcapasos: Tenían un dispositivo piezoeléctrico pegado al interior del casco del marcapasos para sentir la presión del corazón.
- ✚ Catéter: Los dispositivos piezoeléctricos en el extremo del catéter que alimenta a la arteria para quitar bloqueos.
- ✚ Prótesis de oído: Como sensor o micrófono

Los materiales piezoeléctricos se pueden encontrar en componentes tan simples como un encendedor de cocina, en donde, al accionarlo, se aplica una gran presión mecánica en la terminal de un cilindro piezoeléctrico de cerámica pre tensionada, ajustado en este mecanismo.

También dentro de las aplicaciones más conocidas en la actualidad se tienen los siguientes ejemplos:

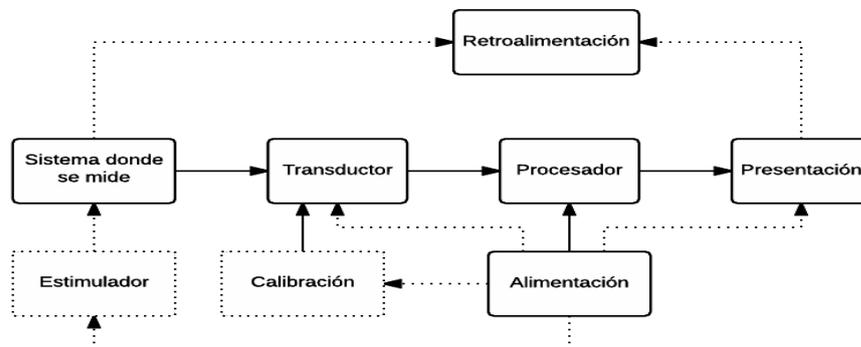
### **Sonares.**

Sound Navigation and Ranging”, mejor conocido como SONAR por sus iniciales, es un equipo tecnológico cuyo objetivo es encontrar objetos en el agua. Tiene un comportamiento similar al de un radar, pero en un medio marino (Muñoz Salas & Sosa Carbajal, 2011). Donde por medio de un transductor piezoeléctrico que se encarga de transformar una señal eléctrica en sonido enviándola al mar y el sonido recibido lo transforma en una señal eléctrica. La etapa de registro permite el almacenamiento de la señal adquirida, este registro se logra empleando hidrófonos, que generalmente utilizan cerámicos piezoeléctricos tales como el PZT (zirconato titanato de plomo) y el PVDF (polivinil fluorido). (Illa, 2005).

### **Transductores.**

Se le denomina transductor a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en otra señal correspondiente de forma física distinta (Khan, Abas, Kim, & Oh, 2016). El transductor en toda cadena o sistema de medición es el primer elemento, por esto que las características del transductor

determinaran en parte las del sistema en general. En la figura 1.3 se muestra la estructura general de un sistema de medida donde puede apreciar el sitio de un transductor (Poblet, 1988).



**Figura 5** Estructura general de un sistema de medida (Poblet, 1988).

La figura 5 describe el proceso adjunto que necesita un transductor para su operación. El proceso inicia en “con que se mide”, para posteriormente pasarlo por el transductor, procesar la información y presentarla. Definitivamente, para que la presentación de la información sea correcta, el transductor debe ser calibrado; y esta calibración ocurre cuando de la información presentada se ha podido hacer una retroalimentación.

Gracias a su tamaño tan pequeño y su bajo costo los transductores piezoeléctricos, han encontrado infinidad de aplicaciones en medicina contribuyen con grandes aportes, como la obtención de imágenes del interior del cuerpo humano, en el sector de la electrónica la gama es infinita desde resonadores, micrófonos, hasta actuadores con resoluciones de nanómetros, también permite la detección y análisis de fallas sin necesidad de interrumpir el servicio de los equipos (Giorgio, Galantucci, Della Corte, & Del Vescovo, 2015). De las principales ventajas con las que cuentan los transductores piezoeléctricos son su alta sensibilidad. Por su alta rigidez mecánica hacen posible medir fenómenos de frecuencia elevada. Este tipo de transductores presentan también sensibilidad direccional, lo que hace posible emplearlos a la medida de movimientos complejos (Sanchez, 2012).

Se tiene una gran variedad de transductores y en la tabla 1 se muestra una clasificación de los tipos de transductores existentes con sus respectivas características.

**Tabla 1** Tipos de Transductores

Tipos de transductores	Características			
Posición, proximidad o presencia	Finales de carrera mecánicos (Posición)			
	Detectores de proximidad	Inductivos	sensibles a materiales ferromagnéticos	De contacto auxiliar
			De bobina	
			Sensibles a materiales metálicos	
	Capacitivos			
	Ópticos	Directos		
		Con fibras ópticas acopladas		
Desplazamiento o movimiento	Pequeños desplazamientos	Resistivos		
		Inductivos		
		Capacitivos		
	Medidores de ángulos	Resistivos		
		Inductivos		
		Capacitivos		
		Encoders o digitales		
Velocidad	Tacómetros	Mecánicos		
Presión /fuerza	Mecánicos			
	Electromecánicos	Piezoeléctricos		
		Resistivos		
		Galgas extensiométricas		
		Capacitivos		
Resistivos				

(Sanchez, 2012)

## Sensores

Un sensor es un dispositivo que produce una señal en respuesta a su detección o medida de una propiedad como posición, fuerza, torque, presión, temperatura, humedad, velocidad, aceleración o vibración (Zavala & Márquez, 2018). Los sensores, los actuadores y los interruptores se han usado para establecer límites de funcionamiento de las máquinas (Serna, Ros, & Rico, 2010).

Los sensores piezoeléctricos basan su funcionamiento en la fuerza o presión aplicada a una sustancia compuesta por cristales polarizados. Al ejercer presión sobre el cristal, éste se deforma produciendo una descarga eléctrica.

Aquí se listan las principales ventajas y desventajas de este tipo de sensor según (De Sousa & Manganiello, 2018) :

Ventajas:

- Alta sensibilidad y bajo coste.
- Alta rigidez mecánica (deformaciones experimentadas < 1microm), apta para medir esfuerzos variables (fuerza - presión).

Desventajas:

- No poseen respuesta en c.c.
- Deben trabajar por debajo de la frecuencia de resonancia del material.
- Los coeficientes piezoeléctricos son sensibles a la temperatura. (Cuarzo hasta 260°C y la turmalita 700°C).
- La impedancia de salida de los materiales piezoeléctricos es muy baja.

## Actuadores

Los actuadores son los elementos de acoplamiento entre el procesamiento eléctrico de la señal (procesamiento de la información) y el proceso (la mecánica). Transforman las señales de poca energía portantes de la información del lugar de medición, en la forma de energía requerida para intervenir en el proceso mediante señales con carga (Valencia, Valencia , & Ibáñez, 2017).

Según el tipo de energía empleada los actuadores se dividen en:

- ✚ Actuadores neumáticos. La fuente de energía es el aire. En este tipo de actuadores destacan los cilindros neumáticos, los motores neumáticos y las válvulas neumáticas y electro neumáticas. Presentan las ventajas de que son baratos, rápidos, sencillos y muy robustos; pero requieren instalaciones especiales, son muy ruidosos y difíciles de controlar
- ✚ Actuadores eléctricos. La fuente de energía es la electricidad: Hay tres grupos: los motores de corriente continua, los motores de corriente alterna (síncronos y asíncronos) y los motores paso a paso. Los actuadores eléctricos son muy precisos y fiables, son silenciosos, su control es sencillo y son de una fácil instalación.

El actuador que se encuentra compuesto por algún material piezoeléctrico funciona de modo que al aplicarle la tensión eléctrica sobre el elemento (piezoeléctrico) sufre contracciones en su longitud debido a la diferencia de potencial. Este efecto es el resultado de la aplicación inversa del mismo principio de los sensores de efecto piezoeléctrico (Valverde Carmona, 2017).

En el presente proyecto de investigación se estudia una alternativa de captación energética que esté a tono con la política de energía actual para el beneficio de la población. El trabajo se deriva de un proyecto de investigación que está en proceso de aprobación que se enfoca en la administración de ciudades inteligentes utilizando conceptos de consumo renovable. Uno de los criterios que se considera como situación problemática dentro del proyecto es la perspectiva que existe de recolecionar la energía ambiental y convertirla en energía eléctrica (Pérez, 2018, pág. 19), además de poder identificar el rendimiento que se obtiene en el proceso de transformación energética. A raíz de los elementos antes descritos se define el problema de investigación con la siguiente interrogante: ¿Cómo determinar la energía eléctrica que se capta en un sistema electrodinámico capacitivo?, el problema abarca todo el proceso de percepción de la energía y se establece la simulación como método para proyectar los resultados a obtener utilizando transductores LVDT.

La opción de lograr la captación de energía a través de un sistema electrodinámico utilizando transductores LVDT para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, se sustenta en estudios realizados previamente con materiales piezoeléctricos (Hajati, 2009, pág. 269). Se aplica un modelo de simulación donde se determina la factibilidad de la recolección de energía utilizando recursos electrodinámicos con la finalidad de incentivar a la implementación de mecanismos donde se logre reaprovechar la energía ambiental a partir de la energía residual de las interacciones cotidianas de los transeúntes.

La investigación se justifica considerando que la alternativa de usar transductores LVDT para recolectar energía eléctrica a partir de los sistemas electrodinámicos, genera una nueva fuente de energía no invasiva para el medio ambiente, donde se podría cubrir la demanda energética implementando materiales piezoeléctricos que facilitan el aprovechamiento de la energía de forma renovable.

Para el desarrollo de la investigación se establecen los siguientes objetivos que proveerán la planificación de todo el proceso investigativo.

## **Objetivos**

### **Objetivo General. –**

Simular la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT.

### **Objetivos Específicos. –**

- Revisar los fundamentos teóricos que respaldan la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT.
- Seleccionar la metodología favorable para la utilización de software MATLAB (Versión 2016), para la simulación de la recolección de la energía.
- Simular el proceso de captación de energía a través de sistemas electrodinámicos capacitivo mediante transductores LVDT

## **2. METODOLOGÍA**

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.

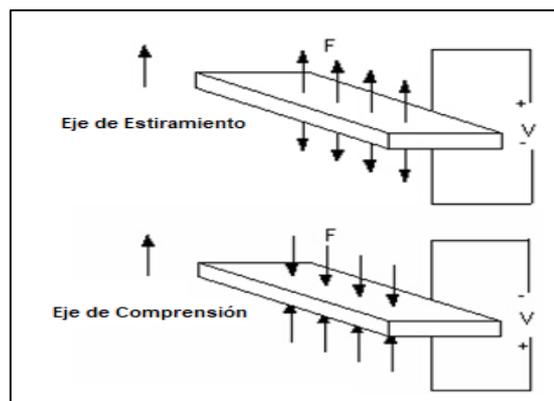
La investigación realizada es del tipo descriptiva con un enfoque experimental de investigación, se desarrolló un software con una interfaz que permite simular la energía generada a partir de un prototipo piezoeléctrico. Desde el punto de vista metodológico se estuvo de acuerdo con (Vásquez Hidalgo, 2016). al definir la investigación como deductivo, debido a que se fundamentan en el análisis de efectos y aporte de conclusiones generales a partir de premisas particulares.

### 2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS

En este capítulo se describe los fundamentos teóricos que aseguran el cumplimiento de los objetivos planteados.

#### 2.2.1 DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA

Se partió de la selección de los materiales piezoeléctrico que son comercialmente más accesible para la implementación de plataformas que generen energía eléctrica. Estos materiales son el Polifluoruro de vinilideno (PVDF), la cerámica piezoeléctrica (PZT) y Polímero PSMNZT, se consideró las características de los mismos para realizar las mediciones y las simulaciones. Estructuralmente se planteó analizar el comportamiento tanto cuando generan impulsos eléctricos por compresión o por estiramiento del material.



**Figura 6** Polaridad de lámina piezoeléctrica (Mateu & Moll, 2005)

Cuando la lámina piezoeléctrica es excitada por el movimiento de las personas al caminar, se estudió todos los esfuerzos que se dan y que se producen en las seis direcciones, las tres cartesianas más las torsiones alrededor de los tres ejes, para poder obtener la carga resultante.

Teniendo en cuenta los ejes de polaridad del material ante las pisadas de las personas se establece como ecuación tridimensional de reacción mecánica producto de la acción de la pisada la siguiente:

$$T_1 = Y_{11}S_1 + Y_{12}S_2 + Y_{13}S_3 \quad (5)$$

donde Y es el módulo de Young de la lámina piezoeléctrica según la dirección del espacio y suponiendo que  $S_2 \approx 0$  y  $S_3 \approx 0$ , podemos concluir que,

$$Ed_3 = d_{31}Y_{11}S_1 \quad (6)$$

Quedando de esta forma predefinida la energía mecánica Ed.

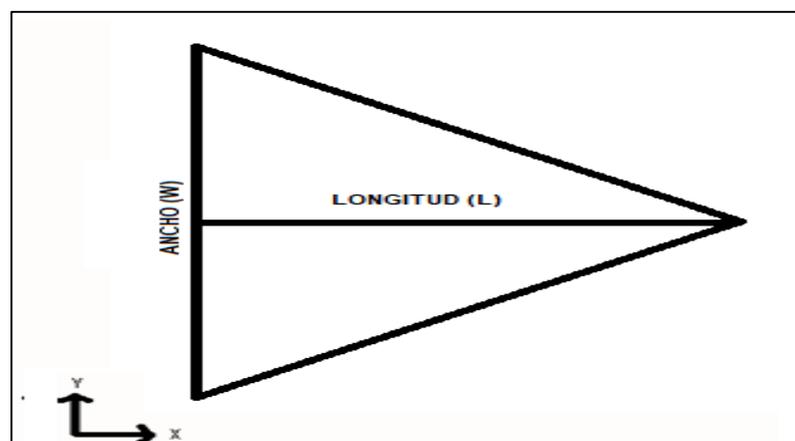
## 2.2.2 DETERMINACIÓN DE LA CARGA Y LA CORRIENTE

### 2.2.2.1 Determinación de la carga

Ya conocida la fórmula para calcular la energía mecánica, se procede a describir el comportamiento eléctrico de la lámina piezoeléctrica analizando la carga eléctrica. La carga eléctrica puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = D_3 \cdot A \quad (7)$$

A su vez, según (Mateu & Moll, 2005). la carga se ha de calcular para una estructura como la de la figura 6, considerada la más eficaz en términos desplazamiento y deformación de la pieza, donde la anchura W depende de X y por ello debemos integrar a lo largo de toda la pieza, L.



**Figura 7** Voladizo Triangular vista plana piezoeléctrico (Mateu & Moll, 2005)

Integrando para la longitud (L) del voladizo:

$$Q = d_{31} \cdot Y_{11} \cdot S_x \int_0^L W(x) dx \quad (8)$$

y la amplitud varía según:

$$W(x) = W_o \left( 1 - \frac{x}{L} \right)$$

Se obtiene la carga para la lámina piezoeléctrica en función de la deformación  $S_x$  producida,

$$Q = d_{31} \cdot Y_{11} \cdot S_x \cdot W_o \cdot \frac{L}{2} \quad (9)$$

Si detallamos el resultado obtenido en la ecuación 9, a partir del criterio de la mejor opción de estructura extraída de los estudios (Mateu & Moll, 2005), entonces sustituyendo  $S_x$  y se obtiene la carga eléctrica en función de los parámetros que conforman la estructura como, grosores de las láminas y módulos de Young.

Obteniendo así el siguiente resultado:

$$Q = d_{31} Y_{11} y \frac{t_c}{2} \frac{t_s}{t_c} \frac{Y_s}{Y_c} \frac{1 + (t_s/t_c)}{1 + [(t_s/t_c)(Y_s/Y_c)]} \frac{W_o}{L} \quad (10)$$

### 2.2.2.2 Determinación de la corriente

Para determinar la corriente que se genera por la deformación que sufre la lámina piezoeléctrica se utiliza el principio de corriente eléctrica, carga eléctrica por unidad de tiempo.

$$I = \frac{dq}{dt} = d_{31} Y_{11} \frac{t_c}{2} \frac{t_s}{t_c} \frac{Y_s}{Y_c} \frac{1 + (t_s/t_c)}{1 + [(t_s/t_c)(Y_s/Y_c)]} \frac{W_o}{L} \frac{dy}{dt} \quad (11)$$

el desplazamiento en el eje y es el único que depende del tiempo, por ello la corriente eléctrica es proporcional a su derivada.

## 2.3 IMPULSO MECÁNICO

El desarrollo de un generador piezoeléctrico busca transformar la energía mecánica en energía eléctrica a partir de los pasos de un individuo. El generador a diseñarse consta de una serie de baldosas piezoeléctricas que buscan remplazar a la baldosa inerte existente. La notable diferencia radica en que éstas tienen la capacidad de generar energía eléctrica mediante la deformación mecánica de un grupo de discos piezoeléctricos.

La implementación de una tecnología de transformación de energía, basada en el efecto piezoeléctrico, en lugares de alto tráfico peatonal, comprende y acarrea consigo una serie de factores que deben ser considerados cuando se plantea que dicha transformación sea propiciada o inducida mediante la fuerza obtenida a partir de la pisada humana.

## 2.4 MÉTODO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE CAMINAR

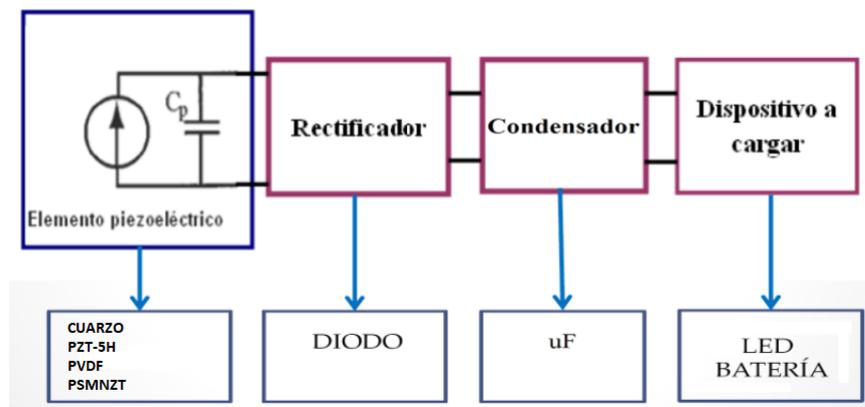
Se vislumbra claro que la simple acción de caminar, es capaz de liberar y ejercer, en la superficie de contacto una fuerza mecánica, que, de ser concentrada, se expondría como una fuente de energía basta, capaz de accionar, como en la mayoría de los generadores actuales, algún mecanismo de generación. Recordemos que el generador de una central hidroeléctrica es impulsado mediante la fuerza concentrada de un flujo de agua; un generador perteneciente a una central térmica, es impulsado por la fuerza mecánica obtenida del vapor; el generador dispuesto en torres de captación de energía eólica adquiere su impulso mecánico inicial por la acción de la fuerza del viento sobre sus alabes. Ahora; ¿por qué no accionar algún generador mediante la fuerza mecánica de la pisada humana?

La idea de generación de energía a partir de la pisada humana; conlleva un estudio de la misma, es decir, Cuánta energía mecánica se es posible obtener de ella. Con base en estas preguntas, retomaremos un estudio enfocado a esos criterios. El “Human-powered wearable computing”, un estudio realizado por T. Starner revela que se pueden obtener hasta 67 watt de potencia a partir de un golpe de talón durante una caminata. Esta cantidad de potencia puede ser provista por una persona con un peso aproximado de 68 kg. La constancia de la caminata es equivalente a hacer 2 pasos/segundo, con el talón moviéndose 5cm (Agudelo Vélez & García Alegrias, 2016). Esto se ve reflejado en la ecuación 12.

$$(68Kg)(9.8m/s^2)(0.05m) (2 \text{ pasos}) = 67 \text{ W/s (Watt/Seg)} \quad (12)$$

La evolución tecnológica de los materiales cerámicos suplantó a los materiales piezoeléctricos naturales, y expandieron en variedad la siguiente generación de materiales piezoeléctricos, usados en aplicaciones para la acústica, óptica, medicina y comunicación inalámbrica (Pisando y generando). Los elementos piezoeléctricos son fabricados de simples cristales de niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), cuarzo sintético, y otros materiales que pueden exhibir propiedades piezoeléctricas significativamente superiores, en relación a los elementos poli cristalinos. Relativa insensibilidad a la temperatura, factores elevados de conversión de energía eléctrica y energía mecánica, entre otros atributos, hacen que ha estos materiales se les pueda dar un gran uso.

De esta manera se propone el esquema general para recolección de energía con el empleo de elementos piezoeléctricos. (ver figura 6)



**Figura 8** Esquema eléctrico general para la recolección de energía con el empleo de elementos piezoeléctricos (Agudelo Vélez & García Alegrias, 2016).

## 2.5 CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS APLICABLES AL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO PZT

La elección del material piezoeléctrico (PZT) se fundamenta en la amplia existencia de éste en el mercado, su bajo costo, sus altas y mejores propiedades de generación, con respecto a los piezoeléctricos naturales y por su diseño compacto y geométrico; además de mejores características de polarización.

Para el análisis completo del generador de piso (baldosa), que se construye a partir de materiales piezoeléctricos cerámicos, habrá que considerar los parámetros propios de este material, éstos se enlistan a continuación.

- a) Tipo de material piezoeléctrico.
- b) Constante piezoeléctrica.
- c) Dimensiones del piezoeléctrico.
- d) Nivel de deformación.
- e) Pérdidas de carga.
- f) Capacitancia estática del piezoeléctrico.
- g) Fuerza ejercida sobre el material.
- h) Resistencia de los transductores piezoeléctricos.

Si bien los materiales piezoeléctricos monocristalinos se siguen desarrollando, los materiales piezoeléctricos más utilizados son los materiales cerámicos policristalinos y los polímeros. Estos materiales presentan carácter piezoeléctrico después de haber sido sometidos a una polarización artificial. La cerámica piezoeléctrica más empleada se denomina titanato zirconato de plomo (PZT). Su composición química es  $Pb_x (TiZr)_{1-x}O_3$ . Una de las composiciones comercialmente más típicas contiene aproximadamente el 47% de  $PbTiO_3$  y el 53% de  $PbZrO_3$ .

El polímero piezoeléctrico más desarrollado es el poli (fluoruro de vinilideno) (PVDF). Los materiales piezocerámicos tienen la propiedad de ser rígidos y dúctiles, por lo que son buenos candidatos para emplearlos como actuadores, debido a su gran módulo de elasticidad, lo cual facilita el acoplamiento mecánico con la estructura. En cambio, los piezopolímeros están mejor preparados para actuar como sensores porque añaden una rigidez mínima a la estructura dada su flexibilidad y además son de fácil elaboración. La forma más habitual de emplearlos es como sensores de contacto y transductores acústicos en forma de lámina delgada.

Los materiales piezoeléctricos han sido embebidos en materiales compuestos en aplicaciones como la amortiguación de vibraciones o la detección de impactos (como en los airbags, donde el material detecta la intensidad del choque y envía una señal eléctrica que activa el airbag). Un ejemplo interesante es el de los sensores piezoeléctricos de distribución constante como es el caso de las pinturas piezoeléctricas o inteligentes. Este tipo de pintura puede prepararse utilizando polvo cerámico a base de titanato zirconato de plomo como pigmento y con resina epóxica como aglomerante. La mezcla se aplica sobre una superficie y se cura y polariza a temperatura ambiente. La película de pintura resultante actúa como un sensor de vibraciones y emisiones acústicas para la superficie entera.

**Tabla 2** Propiedades físicas y eléctricas de los materiales piezoeléctricos

MATERIALES	$V_L$ (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_{33}$ (C/m <sup>2</sup> )	$\epsilon^s_{33}$ (C <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	$h_{33}$ (C <sup>2</sup> /Nm <sup>2</sup> )
CUARZO	5,000.0	2,600.0	0.17	$4.03 \times 10^{-11}$	$1.49 \times 10^9$
PZT – 5H	3,800.0	7,631.6	23.3	$1.29 \times 10^{-9}$	$18.0 \times 10^9$
PVDF	2,200.0	1,781.8	0.16	$5.0 \times 10^{-11}$	$3.2 \times 10^9$
PSMNZT	3,800.0	7,631.6	35.4	$2.40 \times 10^{-8}$	$1.48 \times 10^9$

(Reyes-Villagrana &amp; Contreras-Solorio, 2014)

Donde  $V_L$  es la velocidad longitudinal del sonido,  $\rho$  es la densidad,  $e_{33}$  es la constante de esfuerzo piezoeléctrica,  $\epsilon^s_{33}$  es la permitividad a deformación constante, y de los materiales.

## 2.6 TENSIÓN ELÉCTRICA POR DEFORMACIÓN

Con el fin de calcular la tensión eléctrica generada a partir de la deformación del cerámico piezoeléctrico, se debe conocer la constante piezoeléctrica correspondiente al material. Esta constante define la proporción entre la variación dimensional ( $\Delta l$ ) del material piezoeléctrico en metros y la diferencia de potencial aplicada en Volts. Define la generación de cargas eléctricas en Coulombs, y la fuerza aplicada en el material en Newtons (Rincón, Martínez, & Ibáñez, 2006).

La ecuación 13 define la tensión generada por una carga mecánica que actúa sobre un área determinada de un piezoeléctrico PZT

$$V = (-g_{33} * h * f) = -((g_{33} * h) / (4 * d^2)) \quad (13)$$

Para fines de este proyecto, y por los requerimientos del mismo; del listado anterior de las propiedades totales de un material piezoeléctrico, únicamente se considerarán los parámetros fundamentales de dicho material; siendo estos, el diámetro del piezoeléctrico el nivel de deformación alcanzado, la fuerza ejercida sobre el material y la resistencia de los transductores piezoeléctricos.

Dónde:

V: Es la tensión pico esperado por la deformación del material. (V)

$g_{33}$ : Constante piezoeléctrica. (Vm/N)

h: Longitud o grosor del piezoeléctrico. (mm)

f: Fuerza que se le imprime al cerámico piezoeléctrico. (N)

d: Diámetro efectivo del cerámico piezoeléctrico.

A: Área del cerámico piezoeléctrico.  $m^2$  A la fuerza aplicada sobre esta área se le denomina también nivel de estrés del material piezoeléctrico.

En este caso, para un disco PZT (Zirconato Titanato de Plomo) de 27mm de diámetro en su diafragma y 20mm de diámetro en el cerámico, la constante piezoeléctrica es del orden de:  $25 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$ " (Gómez Molina, 2018).

## 2.7 INTENSIDAD DE LA CORRIENTE

Los elementos de generación piezoeléctricos, al estar conectados en paralelo, conservan una tensión de salida igual, independientemente de la cantidad de elementos que se encuentren conectados. Sin embargo, la corriente varía dependiendo la cantidad de elementos conectado además de la impedancia presentada por los mismos.

Por su naturaleza, los dispositivos utilizados presentan una elevada impedancia, aproximadamente  $400\Omega$ . Aparentemente no es una cantidad considerable, no obstante, por las características del material, se considera una resistencia elevada. Debido a esa gran resistividad presentada al flujo de energía eléctrica, los valores de corriente son demasiado bajos. Estos valores oscilan en la escala de los miliamperes; para el caso de los dispositivos cerámicos se considera una corriente base del orden de  $1\text{mA}$  (Vidal, González, & Sorichetti, 2016).

### 2.7.1 POTENCIA GENERADA

La potencia generada a partir del accionamiento del generador, está definida como el producto de la tensión de salida por la intensidad de corriente. Esta potencia se calcula a través de la ecuación 14.

$$P = (V)(I) \quad (14)$$

Dónde:

P: es la potencia generada en watt (W)

V: es el voltaje que circula por el circuito en volts (V)

I: es la intensidad de corriente en Amperios (A)

## 2.8 FUERZA APLICADA A LOS DISCOS PIEZOELÉCTRICOS

Para el cálculo de la fuerza que se ve ejercida o aplicada sobre los discos cerámicos, se utilizará la ecuación 15. La fuerza aplicada se estima considerando el peso promedio de la población mundial; esto es un peso aproximado de 80 kilogramos y la fuerza de gravedad de la tierra a nivel del mar

$$f = m * g \quad (15)$$

Donde

m: es la masa del objeto que activa el piezoeléctrico. (Kg)

g: corresponde a la constante de gravedad equivalente a 9,81 m/s<sup>2</sup>.

## 2.9 ÁREA EFECTIVA DE ACCIÓN DEL DISCO

El área efectiva de acción para el disco piezoeléctrico, es aquella área en donde se concentra la participación del material cerámico. La ecuación 2.5 permite calcular dicha área de acuerdo al diámetro del disco (Rincón, Martínez, & Ibáñez, 2006).

$$A = (AC^2) * (\pi/4) \quad (16)$$

Donde:

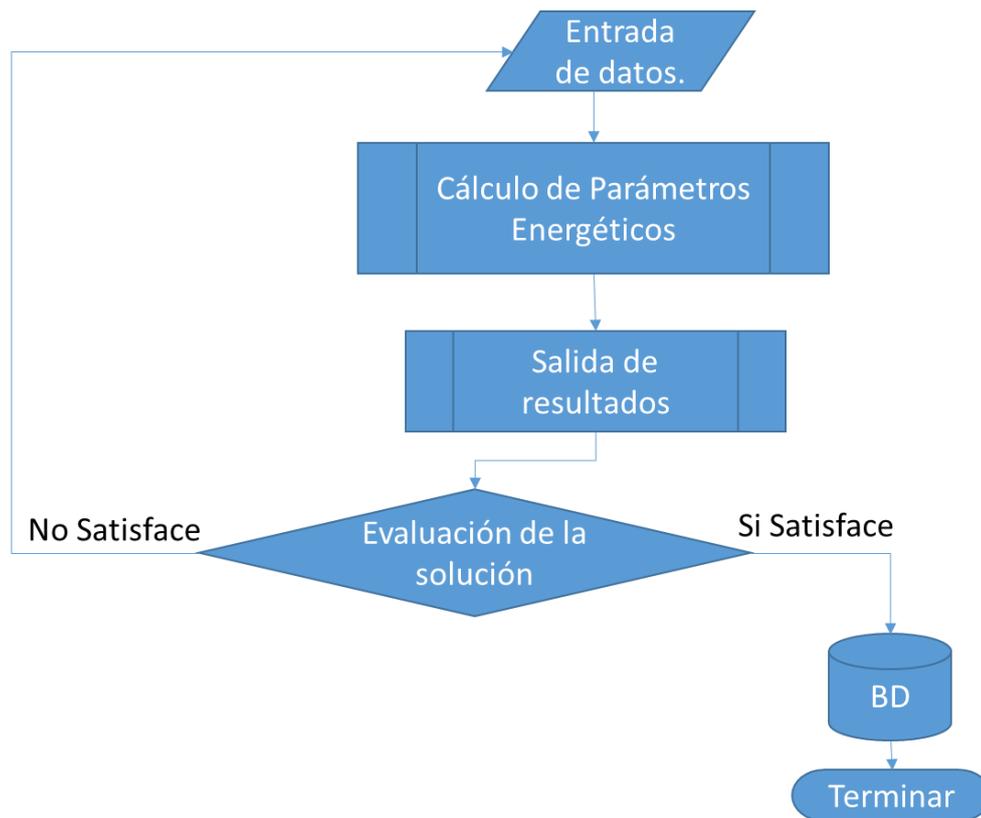
A= área efectiva de acción del disco

$\pi$ = 3.1416 Cte.

AC= área total del cerámico m<sup>2</sup>

## 2.10 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN

A partir de los modelos matemáticos ya descritos y los principales parámetros de la generación de energía con el empleo de materiales piezoeléctricos, fue implementada una aplicación en el ambiente de trabajo de MATLAB. El algoritmo generado para el desarrollo jerárquico de la simulación se muestra en la figura 9.



**Figura 9** Algoritmo generado para el desarrollo de la simulación

El proceso de entrada de datos permite introducir el tipo de material piezoeléctrico que se va a simular, en número de discos que se utilizarán por lasas, el flujo de personas al día y la cantidad de lozas disponibles para accionar por una persona. De esta manera se definen los parámetros del piezoeléctrico y del entorno.

El proceso de cálculo, se utilizarán primeramente los datos que describen el material piezoeléctrico, de esta manera será calculada la tensión aplicada en cada pisada sobre el mismo y los valores de voltaje, corriente generados y frecuencia. Se tendrá en cuenta los factores del entorno y se podrá estimar la cantidad de energía entregada por el sistema correspondiente a los parámetros de entrada establecidos.

Una vez calculada la energía cedida por el sistema se muestran en pantalla o pueden ser impresos para su posterior evaluación. Durante la evaluación de los resultados obtenidos serán comparados contra los requerimientos de demanda establecidos por el analista, de esta manera si satisface las restricciones eléctricas y subjetivas impuestas se considera como una solución que no satisface y el sistema debe permitir el regreso a los parámetros de entrada para modificar a criterio y poder generar nuevamente todo el proceso.

En caso de que la solución satisfaga las restricciones impuestas, se almacenará en una base de datos con el objetivo de almacenar información que puede ser utilizada para comparar y tomar decisiones sobre que variante implementar bajo determinadas condiciones.

Matlab es la herramienta seleccionada para el desarrollo del algoritmo propuesto ya que permite de manera integral realizar la validación e implementación del modelo propuesto. “Matlab” es una abreviatura de “MATrix LABoratory” perteneciente al desarrollador de paquetes de software “MathWorks”, es una herramienta de desarrollo de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con lenguaje de programación incorporado, “Lenguaje M”, está disponible para las siguientes plataformas:

- Unix
- Windows
- Mac OS X
- GNU / Linux

Entre las prestaciones principales de “Matlab” se halla el desarrollo de matrices (operaciones, relaciones, etc.), la representación de datos y funciones matemáticas, la implementación de algoritmos adaptándolos a su lenguaje incorporado, el diseño de interfaces gráficas de usuario (GUI), y el enlace con otros programas de diferentes lenguajes (No lenguaje “m”) y de dispositivos de hardware como microprocesadores, tarjetas de adquisición de datos y de más (MathWorks, 2015).

El paquete de “Matlab” dispone de dos prestaciones de asistencia al proceso de desarrollo, estas prestaciones son:

- Simulink (Plataforma de simulación multidominio)
- GUIDE (Editor de interfaces de usuario “GUI”)

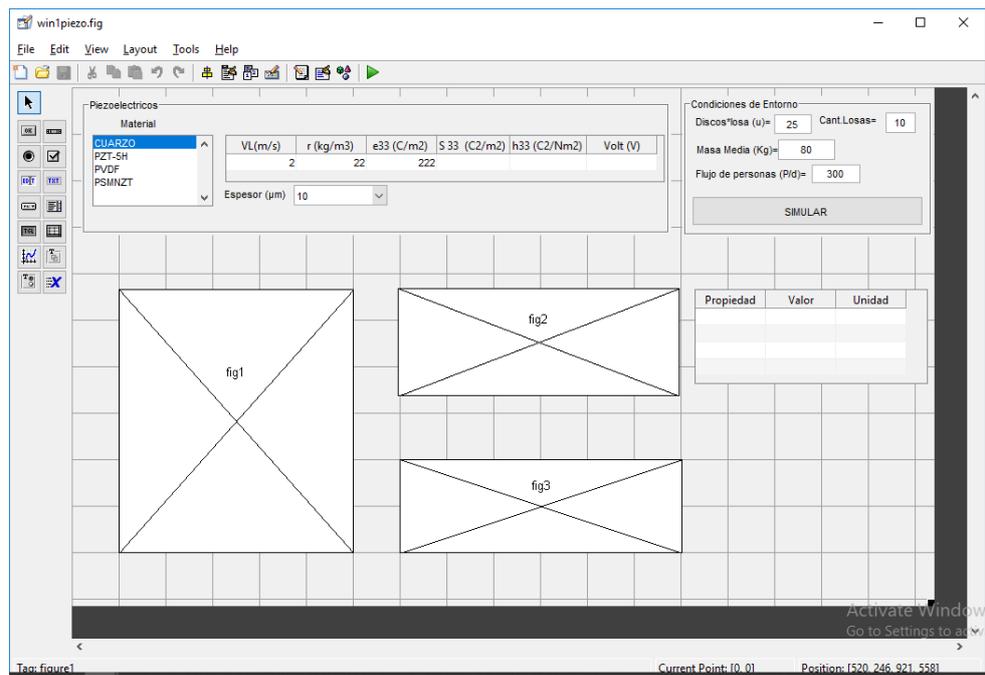
Adicional a las prestaciones de software ya mencionadas, y por medio de las actualizaciones constantes de “Matlab” se puede añadir cajas de herramientas “toolboxes” que brindan asistencia al proceso de desarrollo y dentro de la prestación “Simulink” se pueden integrar paquetes de bloques adicionales o “blocksets”.

El uso de “Matlab” ha cobrado mucho auge en los últimos años debido a su rol fundamental para tareas de investigación y desarrollo, tanto en las ciencias básicas como en la ingeniería aplicada, una de las características fundamentales del entorno de “Matlab” son sus constantes actualizaciones



A su vez con el empleo del Editor de interfaces de usuario “GUI” se desarrolló el diseño, controles y elementos de acción y visualización de la interface de usuario.

Se establecieron los controles que permiten los datos de entrada, los elementos de acción para la ejecución del cálculo y simulación, y los elementos de visualización para poder apreciar de forma gráfica y numérica los valores arrojados del modelo simulado de generación de energía eléctrica. (Figura11).



**Figura 11** Interfaz de modelo simulado de generación de energía eléctrica

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Una vez implementado el algoritmo propuesto en el entorno de desarrollo del Matlab, fue necesario ejecutar varias pruebas al programa con la intención de validar los resultados ofrecidos por el mismo.

A partir del estudio de la bibliografía especializada fueron seleccionados un conjunto de resultados experimentales, los cuales fueron validados por métodos prácticos de medición. Se realizarán corridas del sistema propuestos con los mismos parámetros de entrada con los cuales se establecieron las condiciones de experimentación y serán contrastados los resultados de la simulación con los obtenidos por experimentación práctica.

#### **3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

De los materiales piezoeléctricos de interés para el estudio se tienen, por ensayos experimentales, la máxima amplitud de voltaje teniendo en cuenta la variación de su espesor y de las cargas de deformación aplicadas.

Se realizaron las corridas al programa desarrollado en el presente proyecto, introduciendo una fuerza constante aplicada sobre el disco piezoeléctrico equivalente a 770 N, variando solo el espesor y material del mismo, tal como realizaron los autores del referido experimento.

Por cada material y espesor se simulo la generación de voltaje (Figura 12, 13,14) Obteniendo además los datos de generación de energía, de un área estimada, conformada por losas piezoeléctricas. De esta manera se pude estimar la potencia generada bajo diferentes condiciones de evaluación.

El sistema ofrece las gráficas de Potencia generada en función del número de personas, el voltaje calculado en un disco según material y fuerza aplicada, campo de energía generado según la frecuencia del material y la potencia generada por un disco, por pisada y total durante el flujo de personas establecido.

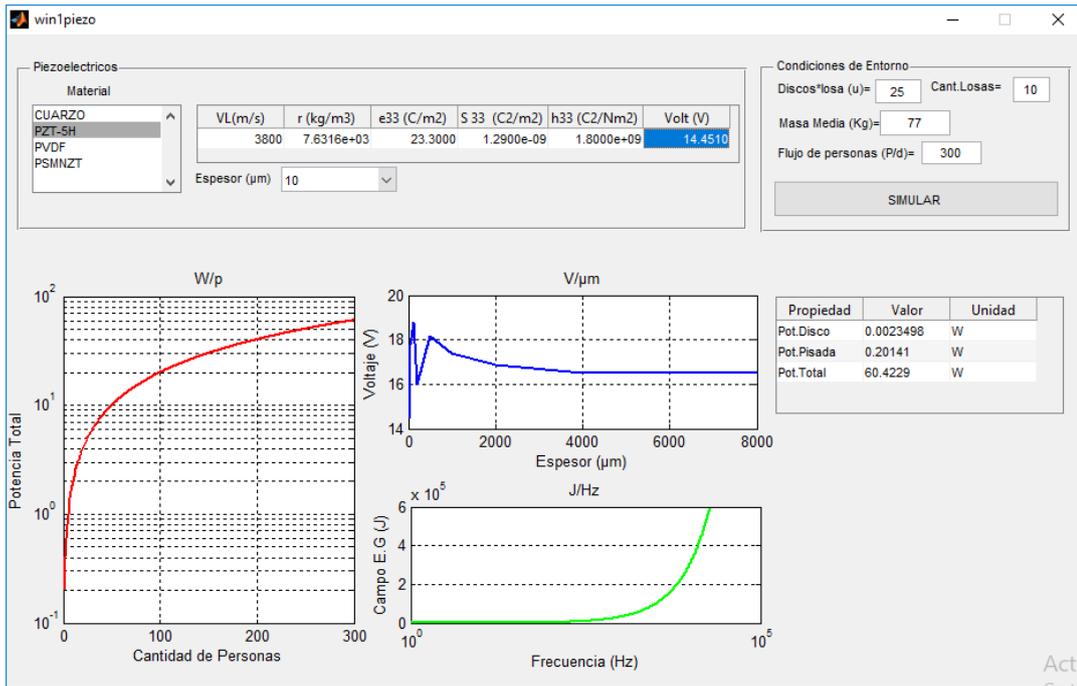


Figura 12 Diálogo de simulación del sistema caso I

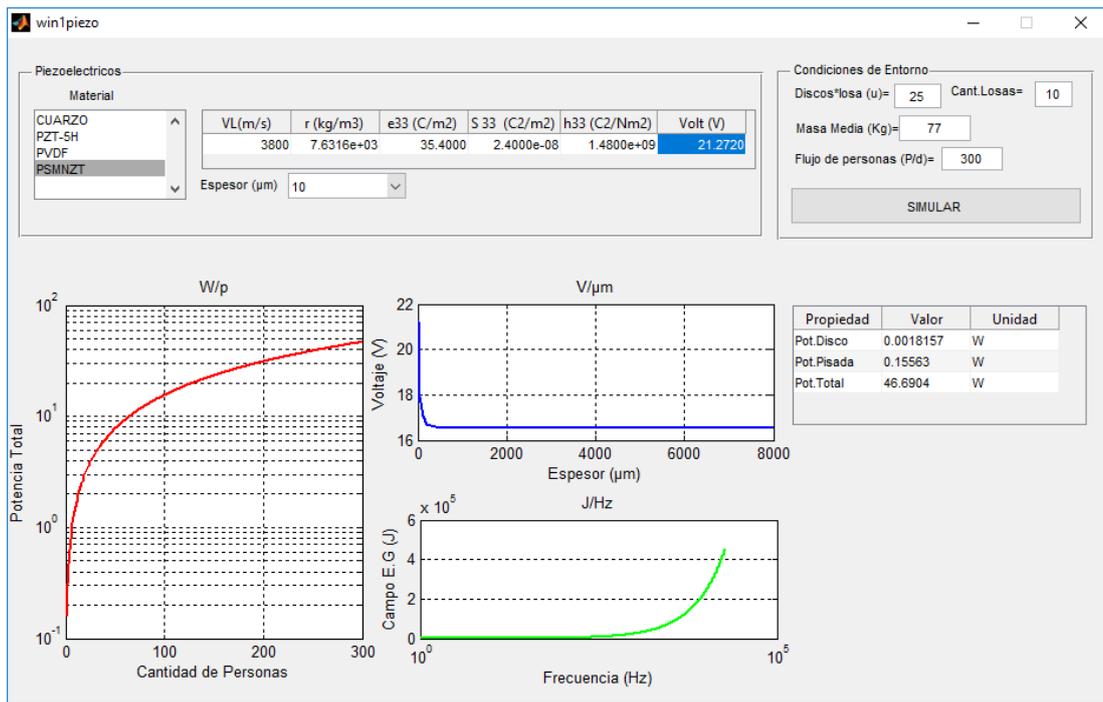


Figura 13 Diálogo de simulación del sistema caso II

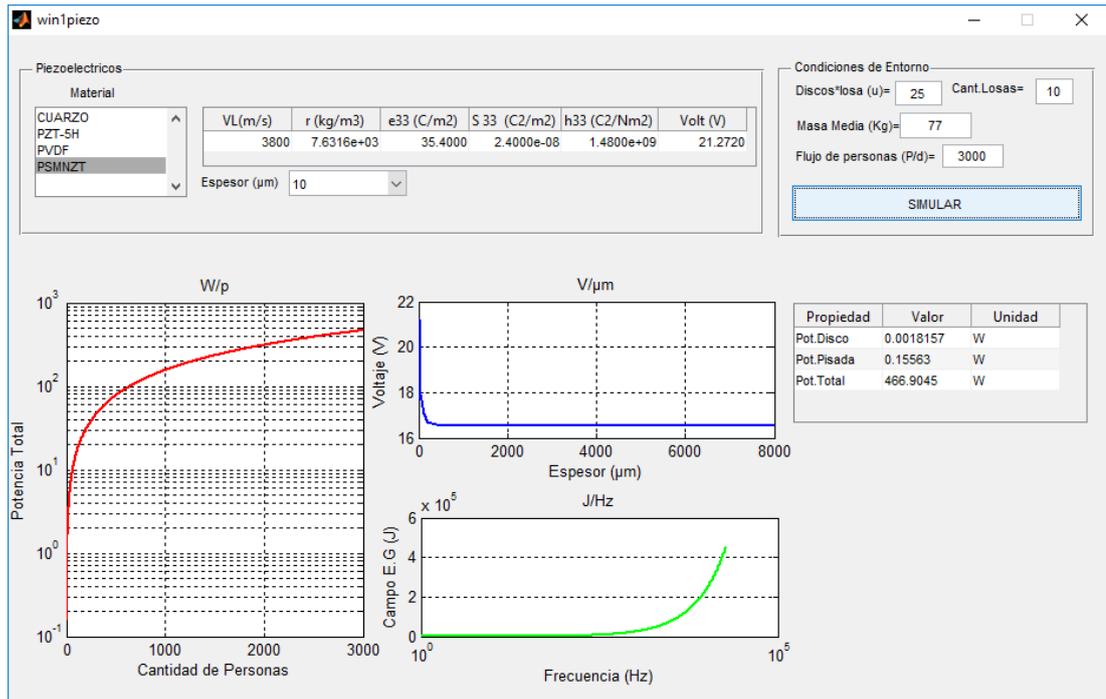


Figura 14 Diálogo de simulación del sistema caso III

### 3.2 MEDICIONES OBTENIDAS

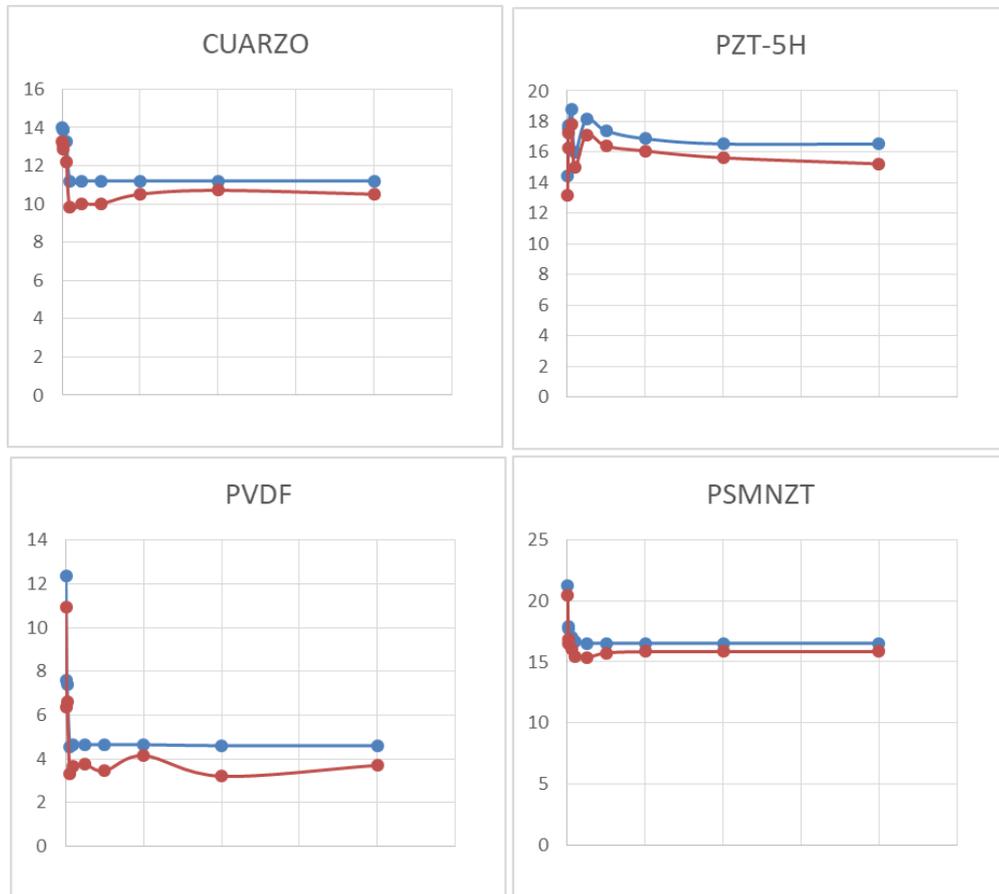
A partir de los datos obtenidos en las simulaciones se realizó un contraste con los datos experimentales de referencia los cuales se muestran en la Tabla 2. (Los valores de las columnas con el sufijo Sim, representan los valores obtenidos de la simulación, y los del sufijo Exp, son los datos referenciados del estudio experimental.)

Tabla 3 Propiedades físicas y eléctricas de los materiales piezoeléctricos

ESPESOR (µm)	CUARZO		PZT-5H		PVDF		PSMNZT	
	(V)Exp	(V)Sim	(V)Exp	(V)Sim	(V)Exp	(V)Sim	(V)Exp	(V)Sim
10	13.988	13.288	14.451	13.151	12.37	10.97	21.272	20.472
28	13.873	13.073	17.572	16.272	7.583	6.383	17.746	16.846
40	13.873	12.873	17.746	17.246	7.398	6.598	17.919	16.519
110	13.295	12.195	18.786	17.786	4.537	3.337	17.052	16.052
200	11.214	9.814	16.012	15.012	4.653	3.653	16.705	15.405
500	11.214	10.014	18.15	17.15	4.653	3.753	16.532	15.332
1000	11.214	10.014	17.399	16.399	4.653	3.453	16.532	15.732
2000	11.214	10.514	16.879	16.079	4.653	4.153	16.532	15.832
4000	11.214	10.714	16.532	15.632	4.609	3.209	16.532	15.832
8000	11.214	10.514	16.532	15.232	4.609	3.709	16.532	15.832

(Reyes-Villagrana & Contreras-Solorio, 2014)

Durante el contraste de los valores de voltaje obtenidos es de destacar que los valores distan en un rango de dispersión no mayor a 0,7 V (Figura ,13), siendo un error inferior al 6% entre ambas pruebas, lo cual permite validar como correctos los datos simulados en el sistema desarrollado.



**Figura 15** Gráficas de contraste para cada material (Espesor eje X, vs Voltaje eje Y)

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 CONCLUSIONES**

recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT.

Se desarrolló una aplicación sobre entorno Matlab para Simular la recolección de energía de un sistema electrodinámico capacitivo mediante transductores LVDT.

Fueron comparados los valores de simulación de voltaje, teniendo en cuenta los tipos de materiales, espesores y cargas aplicadas y dieron como resultado que el error estimado para la simulación, contra datos experimentales prácticos no supera el 6%, lo que resulta viable para considerar el modelo de simulación como validado.

### **4.2 RECOMENDACIONES**

Enriquecer el modelo de simulación con nuevos materiales piezoeléctricos y considerar otras variables de entorno y generación de energía para que la simulación tribute en mejor medida a la toma de decisiones y cuidado del medio ambiente.

Considerar para futuros proyectos la implementación de software como pronóstico previo de la cantidad de energía que se genera producto de los materiales piezoeléctricos.

Ampliar los estudios de nuevos materiales piezoeléctricos que optimicen los procesos de obtención de energía

## **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍAS

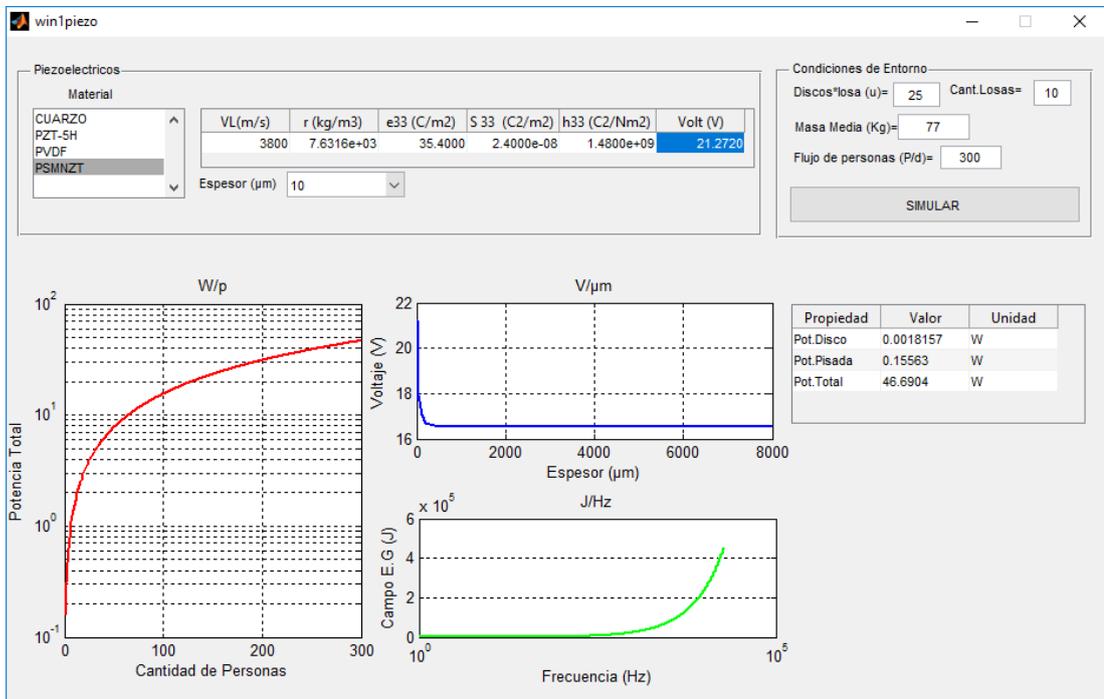
- Agudelo Vélez, F., & García Alegrias, A. (2016). *Sistema de Microgeneración de Energía a través del Ejercicio Humano*.
- Bertinat, P. (2016). *Transición energética justa: pensando la democratización energética*. Uruguay: Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Booth, R. F. (2017). (2017). *Procesamiento y caracterización de materiales cerámicos refractarios del sistema  $ZrO_2-CaO-MgO-SiO_2$* . La Plata: (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Exactas).
- Bronder, P. (2018). Innovation in Materials and Energy. *Sustainable Innovation and Impact*, 25.
- Comercio, E. (22 de 11 de 2009). *El Comercio*. Obtenido de El Comercio: <https://www.elcomercio.com/actualidad/sistema-obtiene-energia-olas.html>
- De Sousa, C., & Manganiello, L. (2018). Estado del Arte: Aplicaciones de los sensores piezoeléctricos en la detección de elementos contaminantes en alimentos. *Revista INGENIERÍA UC*, 25(3), 433-477.
- Escobar, L. R. (2017). EL CAMBIO DE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN EL ECUADOR Y SU INCIDENCIA EN EL DESARROLLO SOCIAL Y ECONÓMICO DE LA POBLACIÓN. *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria*, 25-36.
- Giorgio, I., Galantucci, L., Della Corte, A., & Del Vescovo, D. (2015). Piezo-electromechanical smart materials with distributed arrays of piezoelectric transducers: current and upcoming applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 47(4), 1051-1084.
- Gómez Molina, Á. (2018). *Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos*.
- Hajati, A. &. (2009). Wide-bandwidth MEMS-scale piezoelectric energy harvester. *PowerMEMS'09*, 269-72.
- Illa, M. A. (2005). *Medición de profundidad de reservorios, ríos y lagos a través de telemetría para obtener la sección transversal (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Mayor de San Marcos)*.
- Jimenez, B. (2006). *Materiales piezoeléctricos*. Madrid.
- Khan, A., Abas, Z., Kim, H., & Oh, I. (2016). Piezoelectric thin films: an integrated review of transducers and energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, 25(5), 053002.
- Mateu, L., & Moll, F. (2005). Optimum piezoelectric bending beam structures for energy harvesting using shoe inserts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10), 835-845.
- MathWorks. (13 de Marzo de 2015). *MathWorks*. Obtenido de [www.mathworks.com/products/matlab](http://www.mathworks.com/products/matlab)

- Muñoz Salas, K., & Sosa Carbajal, C. (2011). *Diseño de un sistema de verificación del estado de los sónares utilizados en la actividad pesquera*.
- Pascual, M. (2008). *Cristaloquímica "Estructuras Cristalinas. Modelos estructurales básicos"*.
- Pereira, A. (2010). *Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades*. São Carlos - Brasil.
- Pérez, A. P. (2018). *Análisis y simulación de un sistema electromecánico de tipo capacitivo para la captación de energía*. España: Universidad de Sevilla.
- Perez, E., & Velásquez, S. (2016). *Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia*. México.
- Poblet, M. (1988). *Introducción a la bioingeniería*. Barcelona. Barcelona: Marcombo Boixareu.
- Reyes-Villagrana, R. A., & Contreras-Solorio, D. A. (2014). Simulation and comparison of electrical response of some piezoelectric materials used in the medical echography. *Nova Scientia*, 6(11), 135-157.
- Rincón, E., Martínez, L., & Ibáñez, D. (2006). *Resistencia de materiales: determinación de tensiones y deformaciones*. Editorial Visión Libros.
- Sanchez, H. (2012). *Caracterización de un cerámico Circonato Titanato de Plomo sintetizado por el proceso spark plasma sintering, Doctoral dissertation, 2012*.
- Serna, A., Ros, F., & Rico, J. C. (2010). *Guía práctica de sensores*. Creaciones Copyright SL.
- Valencia, J., Valencia, J., & Ibáñez, D. (2017). SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL BASADO EN EL SOFTWARE RTMC APLICADO AL PROCESO DE BIODIGESTIÓNANAERÓBICA. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(26).
- Valverde Carmona, J. M. (2017). *Actuador térmico de burbuja para movimiento de muestras líquidas*.
- Vásquez Hidalgo, I. (2016). *Tipos de estudio y métodos de investigación*. Obtenido de <https://nodo.ugto.mx/wp-content/uploads/2016/05/Tipos-de-estudio-y-m%C3%A9todos-de-investigaci%C3%B3n.pdf>
- Venet, M. (2004). *Historia de los materiales piezoeléctricos. Efecto piroeléctrico, electrostrictivo, electróptico. Proceso de fabricación de cerámicas piezoeléctricas*. San Carlos.
- Vicioli. (2009). *Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico*. Mendoza.
- Vidal, A. F., González, M. G., & Sorichetti, P. (2016). Sensores piezoeléctricos para aplicaciones optoacústicas: efectos de los procesos de relajación. *2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*. In (pp. 1-5). : IEEE.

Zavala, J., & Márquez , J. (2018). Sistema integral de software y hardware para el aprendizaje del funcionamiento y manejo de los sensores. *Pistas Educativas*, 36(112).

**ANEXOS**

## ANEXO 1. INTERFAZ CON MEDICIÓN DE VARIABLES



## ANEXO 2. INTERFAZ CON MEDICIÓN DE VARIABLES

