

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y ELÉCTRICA**

**UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ  
MATEOS**

**“Diseño e implementación de un generador  
piezoeléctrico baldosa, para alimentar un  
sistema de iluminación de baja potencia.”**

## **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRICISTA**

PRESENTAN:

PÉREZ PINEDA ERICK

VELÁZQUEZ ALFARO SALVADOR

ASESORES

M. en C. YORAM ASTUDILLO BAZA

Ing. CARLOS RODRIGUEZ MOTA

M. en C. MARÍA CONCEPCIÓN ORTÍZ VILLANUEVA.



MEXICO, CD. DE MEXICO, AGOSTO DE 2016





---

## **Resumen**

La piezoeléctricidad, como una fuente de generación primaria de energía eléctrica, es una de las formas de generación que se ha visto más limitada ya que pocos son los países que han dedicado inversión, tiempo e investigación al desarrollo de éstas fuentes alternativas de generación.

El presente trabajo busca mostrar que la piezoeléctricidad, en una etapa avanzada de desarrollo, es capaz de convertirse en una fuente confiable y limpia de generación. Se parte del desarrollo de las bases teóricas sobre la piezoeléctricidad, qué es, cómo funciona, por qué funciona, los usos que regularmente se le dan, aplicaciones actuales, modelo matemático y eléctrico. Posteriormente, se comienza con el diseño y construcción de las baldosas piezoeléctricas partiendo de las bases teóricas de generación: Diseño de la baldosa, dimensiones, materiales necesarios, ensamblado de los materiales, conexión eléctrica en la baldosa y protección mecánica a los elementos piezoeléctricos.

Posteriormente se emplea una tecnología auxiliar que permita explotar y llevar a un mayor nivel, la generación observada en las baldosas. La electrónica. Vista como el factor o tecnología auxiliar que detona el nivel de generación de las baldosas. Se diseña, construye y prueba un circuito electrónico propio, especialmente diseñado que permite el almacenamiento, a escalas comparativamente masivas, de la energía proveniente de las baldosas, para posteriormente llevarla al uso pretendido; alimentar un sistema de iluminación de baja potencia. Dando una aplicación a lo antes mencionado, se observan resultados positivos en los ensayos: la creación de una fuente de generación limpia, la obtención de energía en pequeña escala y un sistema de iluminación en operación total.



## ÍNDICE DE CONTENIDO.

<b>Resumen</b> .....	ii
<b>Lista de Figuras</b> .....	vi
<b>Lista de Tablas</b> .....	viii
<b>Simbología</b> .....	ix
<b>Glosario de Términos</b> .....	x
<b>Objetivo General</b> .....	1
<b>Objetivos Específicos</b> .....	1
<b>Introducción</b> .....	2
<b>Estructura del Trabajo</b> .....	3
<b>Estado del Arte</b> .....	4
<b>Planteamiento del Problema</b> .....	6
<b>Justificación</b> .....	7
<b>Limitaciones y alcances</b> .....	8
<b>Capítulo 1. Piezoelectricidad</b> .....	9
<b>1.1 Introducción</b> .....	9
<b>1.1.1 Definición de Piezoelectricidad</b> .....	9
<b>1.1.2. Definición del Efecto Piezoeléctrico</b> .....	9
<b>1.2 Materiales Piezoeléctricos</b> .....	10
<b>1.2.1. Naturales</b> .....	11
<b>1.2.1.1 Cuarzo</b> .....	11
<b>1.2.1.2 Turmalina</b> .....	12
<b>1.2.1.3 Sal de Rochelle</b> .....	12
<b>1.2.2. Sintéticos</b> .....	12
<b>1.3. Constantes que Rigen las Propiedades de la Cerámica Piezoeléctrica</b> .....	13
<b>1.3.1 Coeficientes de acoplamiento k</b> .....	14
<b>1.3.2 Constantes piezoeléctricas d</b> .....	14
<b>1.3.3 Constantes dieléctricas K</b> .....	14
<b>1.3.4 Constantes piezoeléctricas g</b> .....	15
<b>1.3.5 Constantes elásticas s</b> .....	15
<b>1.3.6 Constantes de frecuencia N</b> .....	15



---

1.3.7 Factor de calidad mecánico $Q_m$ y factor de disipación dieléctrico $\tan \delta$ ...	16
1.3.8 Temperatura de Curie. ....	16
1.3.9 Límite de tracción dinámico. ....	16
1.3.10 Tasa de envejecimiento.....	16
1.4 Aplicaciones. ....	16
1.4.1 Sonares.....	19
1.4.2 Transductores.....	19
1.4.3 Sensores.....	21
1.4.4 Actuadores.....	22
1.4.5 Piezoeléctrico como fuente de energía.....	23
1.5 Modelo Matemático y eléctrico del Efecto Piezoeléctrico. ....	24
<b>Capítulo 2. Diseño y Construcción de un Generador Piezoeléctrico.....</b>	<b>33</b>
2.1 Introducción.....	33
2.2 Impulso Mecánico. ....	33
2.3 Método de Generación de Energía a Través de Caminar. ....	33
2.4 Cálculos de los Parámetros Eléctricos y Mecánicos Aplicables al Material Piezoeléctrico PZT. ....	34
2.4.1 Matemáticas Aplicables a los Parámetros Eléctricos. ....	35
2.4.1.1 Tensión eléctrica por deformación. ....	35
2.4.1.2 Intensidad de corriente. ....	36
2.4.1.3 Potencia generada.....	36
2.4.2 Matemáticas Aplicadas a los Parámetros Mecánicos. ....	36
2.4.2.1 Fuerza aplicada a los discos piezoeléctricos.....	36
2.4.2.2 Área efectiva de acción del disco.....	37
2.5 Cálculo y Pruebas de los Parámetros Eléctricos y Mecánicos.....	37
2.5.1 Cálculo de la Tensión por Unidad de Generación.....	37
2.5.2 Ensayos Eléctricos en el Elemento Piezoeléctrico.....	39
2.5.2.1. Tensión generada por impulso directo.....	39
2.5.2.2. Corriente generada por Impulso directo. ....	40
2.6 Ensamble del Generador Piezoeléctrico. ....	42
2.6.1 Construcción de la primera baldosa piezoeléctrica. ....	42



---

2.6.1.1 Base.....	42
2.6.1.2 Asentamientos individuales.....	43
2.6.1.3 Adhesión de los elementos.....	44
2.6.1.4. Interconexión de los elementos piezoeléctricos.....	45
2.6.1.5 Protección mecánica de la baldosa. ....	46
2.6.1.6 Baldosa ensamblada.....	47
2.7 Baldosa en Operación. Tensión en terminales.....	48
<b>Capítulo 3. Implementación del Generador Piezoeléctrico para Obtener Energía Eléctrica</b> .....	50
3.1 Introducción.....	50
3.2 Diseño de los sistemas electrónicos para transmitir y almacenar la energía eléctrica generada por los piezoeléctricos. ....	50
3.2.1 Dispositivos electrónicos utilizados.....	50
3.2.2 Conexión del circuito. ....	53
3.3 Almacenamiento de Energía.....	53
3.4 Aplicación de la energía almacenada por las baldosas piezoeléctricas. ....	56
3.4.1 Ensayo 1: Factor deformante único 83 Kg a una sola pierna. ....	57
3.4.2 Ensayo 2: Factor deformante 70 Kg a dos piernas.....	58
3.4.3 Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna por factor.....	60
3.5 Análisis de resultados.....	61
3.5.1 Análisis Comparativo. Carga del Bloque de Capacitores. ....	62
3.5.2 Análisis Comparativo. Descarga por capacitor. ....	63
3.6 Aplicación de la energía en un sistema de iluminación.....	64
3.7 Análisis de costo-beneficio .....	72
<b>Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	77
4.1 Conclusiones.....	77
5.2 Recomendaciones.....	78
Referencias .....	80



## **Lista de Figuras**

	Pagina
<b>Figura 2.1</b> Estructura cristalina del Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ).....	11
<b>Figura 2.2</b> Estructura de Ciclosilicatos. Turmalina ( $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ).....	12
<b>Figura 2.3</b> Estructura general de un sistema de medida.....	20
<b>Figura 2.4</b> Representación de acoplamiento piezoeléctrico.....	29
<b>Figura 2.5</b> Modelo de agrupación de parámetros mecánicos.....	30
<b>Figura 2.6</b> Modelo general de un circuito de generación con piezoeléctricos.....	32
<b>Figura 3.1</b> Medición de tensión en un disco piezoeléctrico.....	39
<b>Figura 3.2</b> Medición de corriente en un disco piezoeléctrico.....	40
<b>Figura 3.3</b> Placa fibracel con el trazado de las guías para asentamiento.....	43
<b>Figura 3.4</b> Colocación de los asentamientos individuales a partir del trazado de guías.....	44
<b>Figura 3.5</b> Adhesión de los elementos piezoeléctricos.....	45
<b>Figura 3.6</b> Interconexión de los elementos piezoeléctricos.....	46
<b>Figura 3.7</b> Protección mecánica dada a la baldosa mediante la aplicación de silicona.....	47
<b>Figura 3.8</b> Baldosa ensamblada.....	47
<b>Figura 3.9</b> Grafica de la tensión generada por la baldosa variando el peso.....	49
<b>Figura 4.1</b> Circuito electrónico para transmitir y almacenar.....	53
<b>Figura 4.2</b> Circuito Físico.....	54
<b>Figura 4.3</b> Diagrama de bloques del circuito electrónico.....	54
<b>Figura 4.4</b> Conexión circuito electrónico a la baldosa.....	55
<b>Figura 4.5</b> Estado de reposo del circuito electrónico.....	56
<b>Figura 4.6</b> Almacenamiento de energía eléctrica.....	56
<b>Figura 4.7</b> Ensayo 1: Factor deformante único 83 kg a una sola pierna.....	57
<b>Figura 4.8</b> Descarga en el Ensayo 1: Factor deformante único 83 kg a una sola pierna.....	58
<b>Figura 4.9</b> Ensayo 2: Factor deformante Doble 70 Kg a dos piernas.....	59
<b>Figura 4.10</b> Descarga en el Ensayo 2: Factor deformante Doble 70 Kg a dos piernas.....	59
<b>Figura 4.11</b> Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna	60



---

	por factor.....	
<b>Figura 4.12</b>	Descarga en el Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna por factor.....	61
<b>Figura 4.13</b>	Instalación del sistema de iluminación.....	65
<b>Figura 4.14</b>	Instalación de la baldosa piezoeléctrica.....	66
<b>Figura 4.15</b>	Baja carga en la batería.....	67
<b>Figura 4.16</b>	Leds en baja carga de la batería.....	68
<b>Figura 4.17</b>	Carga media en la batería.....	69
<b>Figura 4.18</b>	Leds en carga media de la batería.....	69
<b>Figura 4.19</b>	Carga alta en la batería.....	70
<b>Figura 4.20</b>	Leds en carga alta de la batería.....	70
<b>Figura 4.21</b>	Carga máxima en la batería.....	71
<b>Figura 4.22</b>	Leds en carga máxima de la batería.....	72





## **Lista de Tablas**

	Pagina
<b>Tabla 2.1</b> Tipos de transductores.....	21
<b>Tabla 2.2</b> Constantes piezoeléctricas.....	27
<b>Tabla 3.1</b> Datos del material piezoeléctrico.....	38
<b>Tabla 3.2</b> Medición de la tensión generada por disco con un único peso...	41
<b>Tabla 3.3</b> Medición de la tensión generada por disco con diferentes pesos.....	41
<b>Tabla 3.4</b> Comparación de medición de tensión con 2 multímetros.....	42
<b>Tabla 3.5</b> Medición de la tensión por riel.....	48
<b>Tabla 4.1</b> Lista de materiales electrónicos empleados en el circuito electrónico para la transmisión y almacenamiento.....	52
<b>Tabla 4.2</b> Resultados del Ensayo 1: Factor deformante único 83 kg a una sola pierna.....	58
<b>Tabla 4.3</b> Resultados del Ensayo 2: Factor deformante Doble 70 Kg a dos piernas.....	59
<b>Tabla 4.4</b> Resultados del Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna por factor.....	61
<b>Tabla 4.5</b> Periodos de descarga de los capacitores.....	64
<b>Tabla 4.6</b> Lista de costos en la construcción de 3 baldosas.....	72
<b>Tabla 4.7</b> Lista de costos en la construcción de 12 circuitos electrónicos..	73
<b>Tabla 4.8</b> Lista de costos para la instalación propuesta.....	73
<b>Tabla 4.9</b> Lista de costos en la instalación actual.....	76



## **Simbología**

$\Phi$ :	Relación de Transformación
$\mu$ :	Momento dipolar
$\epsilon$ :	Constantes dieléctricas ( $C^2/Nm^2$ )
Al:	Aluminio
$B_m$ :	Coefficiente de amortiguamiento ( $N * s/m$ )
$C_m$ :	Capacitancia de cortocircuito (m/N)
$C_p$ :	Capacitancia libre (C/V)
E:	campo eléctrico
F:	Fuerza (N)
$F_m$ :	Fuerza externa (N)
GaPO4:	Ortofosfato de galio
$i$ :	Corriente (C/s)
k:	Coeficientes de acoplamiento
$K_m$ :	Constante del resorte (N/m).
$M_m$ :	Masa efectiva (Kg)
NaKC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> ·4H <sub>2</sub> O:	Sal de Rochelle
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> :	Dihidrofosfato amónico
O:	Oxígeno
O <sub>3</sub> :	Ozono
PVDF:	Polifluoruro de vinilideno
PZT:	Titanato Zirconato de Plomo
Q:	Carga
Q <sub>m</sub> :	Factor de calidad mecánico
S:	Deformación mecánica
s:	Constantes elásticas
$s^E$ :	Deformación elástica en un campo eléctrico constante
SiO <sub>2</sub> :	Cristalina del Cuarzo
Si:	Silicio
Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> :	Turmalina
T:	Tensiones mecánicas
t:	Tiempo (seg)
Tan $\delta$ :	Factor de disipación dieléctrico
v:	Velocidad (m/s)
V:	Volts (V)
W:	Watt (W)
$x_m$ :	Desplazamiento de la masa (m)
$\dot{x}_m$ :	Velocidad de la masa (m/s)
$\ddot{x}_m$ :	Aceleración de la masa (m/s <sup>2</sup> )
ZnO:	Óxido de Zinc



---

## **Glosario de Términos**

**Actuador:** Un dispositivo que puede producir fuerza o movimiento (desplazamiento).

**Campo Eléctrico:** es un campo físico que es representado mediante un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica.

**Cerámico:** Es un tipo de material inorgánico, no metálico, buen aislante y que además tiene la propiedad de tener una temperatura de fusión y resistencia muy elevada. Asimismo, su módulo de Young (pendiente hasta el límite elástico que se forma en un ensayo de tracción) también elevado, además presentan un modo de rotura frágil.

**Ciclosilicatos:** Son una división de minerales de la clase silicatos compuestos por átomos de silicio y oxígeno unidos por enlace covalente.

**Efecto piezoeléctrico:** Es un fenómeno físico que presentan algunos cristales debido al cual, aparece una diferencia de potencial eléctrico (tensión) entre ciertas caras del cristal cuando éste se somete a una deformación mecánica.

**Deformación:** Es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

**Dipolo eléctrico:** es un sistema de dos cargas de signo opuesto e igual magnitud cercanas entre sí.

**Ferroeléctricidad:** Propiedad de determinados cristales, por la que poseen una polarización eléctrica espontánea, permanente y reversible bajo la acción de un campo eléctrico exterior.

**HVPZT:** Siglas para High Voltage PZT (PZT de Alta Tensión).

**Materiales Piezoeléctricos:** Materiales que cambian de dimensiones cuando se aplica una tensión y produce una carga cuando se aplica una presión.



**Monocristal:** Es un material en el que la red cristalina es continua y no está interrumpida por bordes de grano hasta los bordes de la muestra. Como los bordes pueden tener efectos importantes en las propiedades físicas de un material, los monocristales tienen interés para la industria y para la investigación académica.

**Paraeléctricidad:** Es la propiedad que presentan numerosos materiales a polarizarse cuando son sometidos a la influencia de un campo eléctrico. A diferencia de la ferroeléctricidad, este fenómeno se produce incluso cuando no existen dipolos permanentes presentes en el material.

**Polarización:** Procedimiento mediante el cual, el cristal obtiene las propiedades piezoeléctricas, es decir, las celdas unitarias se alinean en el material piezoeléctrico.

**Polarización eléctrica:** La polarización eléctrica es un campo vectorial que expresa la densidad de los momentos eléctricos dipolares (producto de la carga eléctrica por la distancia entre las cargas del dipolo) permanentes o inducidos en un material dieléctrico (mal conductor de electricidad).

**Polarización espontánea:** Está definida como la magnitud de la polarización en un solo dominio del ferroeléctrico en ausencia de un campo eléctrico externo.

**Polímeros:** Se definen como macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena.

**PZT:** Siglas para plumbum zirconate titanate. Material cerámico policristalino con propiedades piezoeléctricas.

**Temperatura de Curié:** Es la temperatura en la cual la estructura cristalina del material sufre una transición de fase dejando de presentar propiedades piezoeléctricas.

**Tensor:** Es cierta clase de entidad algebraica de varias componentes, que generaliza los conceptos de escalar, vector y matriz de una manera que sea independiente de cualquier sistema de coordenadas elegido.



---

## Generalidades

### Objetivo General.

Diseñar un prototipo de generador piezoeléctrico que transforme la fuerza mecánica de compresión de peatones en energía eléctrica para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia.

### Objetivos Específicos.

- Evaluar la viabilidad y eficiencia de la utilización de generadores piezoeléctricos cerámicos empleados comúnmente como emisores de sonido; para la generación de energía eléctrica a escalas mayores de su capacidad.
- Diseñar y construir el prototipo de un generador de energía eléctrica a escala, utilizando materiales piezoeléctricos.
- Realizar una serie de ensayos operativos al generador de energía eléctrica, evaluando las respuestas de funcionamiento ante los requerimientos del sistema de iluminación.
- Elaborar un análisis de Costo – Beneficio que nos permita observar la factibilidad, económicamente hablando, en el uso de ésta tecnología como fuente primaria de generación, en comparación con las tecnologías actuales.



## **Introducción.**

En la actualidad la producción energética a gran escala depende de las fuentes no renovables de energía, los llamados combustibles fósiles como son el carbón, petróleo y gas natural; ya que las economías desarrolladas o en vías de desarrollo presentan una dependencia respecto a este tipo de materias primas no renovables, ante esta situación, se busca proponer una fuente de energía alternativa que pueda ser “verde”, limpia y sustentable comparada con las utilizadas en el mundo.

La piezoelectricidad data de 1880 cuando fue descubierta por los hermanos Curie. Se define a groso modo como la propiedad de algunos materiales, que consiste en producir energía eléctrica a partir de la deformación de los mismos. Usualmente con aplicaciones a elementos de señalización; se trata de una fuente de energía sustentable que carece de aplicaciones fuertes.

El efecto piezoeléctrico se origina 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.

Debido a éstas características, es que se realiza una recopilación de datos sobre este tipo de materiales; buscando probar la efectividad, y viabilidad de convertirlos en una fuente de generación primaria a través de la deformación mecánica aplicada, proveniente de la pisada humana. Todo con el objeto de obtener energía eléctrica y poder emplearla en un sistema de iluminación de baja potencia.



---

## Estructura del Trabajo.

El proyecto desarrollado está conformado por cinco capítulos, en seguida se presenta una breve descripción de cada uno de ellos:

En las **generalidades** se detalla la estructura general del trabajo. Los autores manifiestan las razones, los motivos y la importancia de desarrollar este tema y se da una pequeña introducción al contenido. Se definen los objetivos, tanto el general como los específicos, que se pretenden conseguir.

El **capítulo uno** plantea la teoría general del efecto piezoeléctrico y se especifican los diferentes tipos de materiales que son capaces de convertir energía mecánica en eléctrica. Además se mencionan las aplicaciones más difundidas en la actualidad de los materiales piezoeléctricos. También se desarrolla la teoría del modelo matemático y eléctrico que definen el efecto piezoeléctrico.

El **capítulo dos** se desarrolla el diseño y construcción del generador piezoeléctrico que será capaz de generar energía eléctrica. Se describen los materiales empleados para su fabricación, justificando su uso. Además se comprueban los parámetros eléctricos y mecánicos teóricos acerca del material piezoeléctrico.

El **capítulo tres** muestra la implementación del efecto piezoeléctrico para lograr obtener energía eléctrica. Se desarrollan diversas pruebas a las baldosas para verificar su resistencia física y la obtención de energía eléctrica por parte de los materiales piezoeléctricos, culminando con la implementación en un sistema de iluminación de baja potencia.

El **capítulo cuatro** se describe las conclusiones a las que llegaron los autores del trabajo y algunas recomendaciones para futuros trabajos; así como las ventajas y desventajas que se observaron al trabajar con la piezoelectricidad.



## Estado del Arte.

En 1880 la piezoelectricidad fue descubierta por Jacques y Pierre Curie. Piezoelectricidad es el nombre que se le dio al fenómeno que engendra electricidad en ciertos materiales cuando estos se ven sujetos a esfuerzos mecánicos. Estos mismos materiales exhiben el efecto inverso, es decir, muestran una deformación en su cuerpo o estructura, bajo la influencia de un campo eléctrico.

La primera demostración del *efecto piezoeléctrico directo* fue dada por los hermanos Curie. Partiendo de su previo conocimiento en 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.

Por mucho tiempo el efecto piezoeléctrico se mantuvo como algo experimental en laboratorios; posteriormente el trabajo de investigación sobre los materiales que mostraban este efecto se reanudó con el fin de explorar y definir las estructuras de cristal que mostrarían propiedades piezoeléctricas.

En 1910 el físico Alemán Woldemar Voigt publicó "*Lehrbuch der Kristallphysik*", un manuscrito que describe a las 20 clases cristalinas naturales que presentan propiedades piezoeléctricas. Voigt definió las constantes piezoeléctricas utilizando análisis tensorial.

En 1917 se vio la primera aplicación de la piezoelectricidad. En Francia, durante la Primera Guerra Mundial, Paul Langevin desarrolló un detector submarino ultrasónico. [1]

Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, 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. Esto propició investigaciones más profundas sobre el tema que finalmente culminaron en el desarrollo de materiales piezoeléctricos sintéticos como el Titanato de Bario y titanato circonato de plomo.

A partir del descubrimiento de la ferroelectricidad y de sus importantes propiedades piezoeléctricas y con la aparición de soluciones sólidas de Titanato





Circonato de Plomo con enormes coeficientes piezoeléctricos y electromecánicos, las aplicaciones tecnológicas para éstos materiales se desarrollaron de forma espectacular. Sencillamente todos los dispositivos utilizados en conversión de energía electromecánica tienen 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, etc. [2]

En el año de 1970 comenzó el desarrollo de polímeros piezoeléctricos, como el PVDF (Polifluoruro de vinilideno). La importancia práctica de estos materiales reside en su bajo costo de producción en láminas grandes.

En el 2004 James Graham y Thaddeus Juszczik empleando transductores piezoeléctricos alineados en la suela de un zapato 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 2010 J. Paradiso y S. Schenk incorporaron un mini generador piezocerámico en el talón de un zapato para cargar una batería mientras se camina o corre esto gracias a circuitos adicionales. Con una eficiencia del 11%. [3]

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. (Energy Floors).

En el 2014 Rodríguez Gutiérrez Roberto Carlos y Santana Hernández José Alejandro realizan una investigación en la Escuela Superior De Ingeniería Mecánica Y Eléctrica sobre la obtención de energía eléctrica a través de piezoelectricidad, mediante simulaciones y logran el encendido de un mp3.



---

## **Planteamiento del Problema.**

El uso de la energía eléctrica es imprescindible en la vida moderna, difícilmente podríamos imaginar nuestras vidas sin ella. A través de la energía eléctrica tenemos a nuestra disposición máquinas que hacen mucho más fáciles las tareas en el hogar, alumbrado público en plazas, parques, autopistas etc., herramientas y máquinas que son empleadas para el desarrollo tecnológico en muchos aspectos como lo son la posible automatización de formas de producción, avances en medicina, todo esto con el fin de hacer la vida más placentera.

Actualmente la generación de energía eléctrica depende en su mayoría en la quema de combustibles fósiles como lo son el carbón, petróleo, y gas natural o por el consumo de material radiactivo las cuales producen un alto índice de contaminación en el medio ambiente y pueden poner en riesgo la vida humana en caso de alguna falla en el caso de los materiales radiactivos.

Actualmente la creciente demanda de energía eléctrica y la destrucción del medio ambiente han impulsado a la investigación de formas alternativas para obtener energía eléctrica. Una de esas novedosas formas de obtener energía es por medio del efecto piezoeléctrico, el cual es un fenómeno físico que presentan algunos cristales cuando se someten a una deformación mecánica aparece una diferencia de potencial.



---

## **Justificación.**

El presente proyecto busca el desarrollo y la implementación de la piezoeléctricidad como una fuente alternativa de generación de energía eléctrica para el “autoconsumo”. Se fundamenta en las características de éstos materiales, que son capaces de generar electricidad gracias al flujo constante de personas por un área específica; flujo que se traduce en una gran cantidad de energía mecánica desperdiciada que bien podría ser aplicada a materiales piezoeléctricos, dispuestos específicamente para este fin, y así producir un excedente de energía que se emplearía para el autoconsumo

Buscar explotar un modo de generación alternativo en este trabajo, pretende dejar las puertas abiertas a futuras investigaciones en el tema; brindándole a nuestra institución la posibilidad de convertirse en un pilar del desarrollo en energías alternativas.

La implementación de ésta tecnología, permitiría fomentar su uso; impulsar en algún nivel, la aplicación de tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica; esto se fundamenta en el gran cambio que como raza, debemos dar hacia el uso de nuevas fuentes de generación; limpias y sustentables.



---

## **Limitaciones y alcances.**

### **Alcances.**

La trascendencia del presente trabajo radica en lograr alimentar un sistema de iluminación de baja potencia elaborado por leds, a través de la obtención de energía eléctrica por el efecto piezoeléctrico.

La energía es obtenida de baldosas piezoeléctricas a partir de la deformación mecánica de discos piezoeléctricos (PZT) por parte de peatones.

### **Limitaciones.**

La baja potencia obtenida por los elementos piezoeléctricos fue la principal limitación para no poder abastecer un sistema de iluminación convencional o una carga mayor.

La energía obtenida por el efecto piezoeléctrico se basa en la deformación del material y la frecuencia con la que sea sometido a una fuerza mecánica deformante, por lo que fue necesario elaborar un circuito electrónico para su almacenamiento siendo este punto el que abarco más tiempo en la elaboración de las baldosas.

Los materiales piezoeléctricos tienen un límite de fuerza que puede soportar antes de llegar a un punto de ruptura, esta es la razón por la que no se puede instalar este tipo de baldosa en carreteras o en algún otro lugar donde exista un gran tránsito y poder aprovechar la fuerza que ofrecen los vehículos y los transportes férreos y centra su aplicación al flujo peatonal.



## Capítulo 1.

# Fundamentos de la piezoelectricidad

### 1.1 Introducción.

El capítulo que se desarrolla a continuación, busca generar en el lector un amplio panorama acerca de los elementos piezoeléctricos. Se hace un recorrido por los antecedentes, el desarrollo histórico, las aplicaciones actuales y las características intrínsecas que un dispositivo piezoeléctrico posee.

Comenzamos por simples definiciones que nos harán comprender en su totalidad, la parte básica de la piezoelectricidad, Durante el avance; se presentan los materiales que por excelencia, han sido y son los pilares del desarrollo de esta tecnología; conoceremos las propiedades específicas de estos elementos, su modelado tanto eléctrica, como matemáticamente y aplicaciones específicamente orientadas al objetivo del presente trabajo.

#### 1.1.1 Definición de Piezoelectricidad.

La piezoelectricidad es la propiedad que poseen algunas sustancias no conductoras, cristalinas, de presentar cargas eléctricas de signo contrario en sus caras cuando se deforman. [4]

#### 1.1.2. Definición del Efecto Piezoeléctrico.

El efecto piezoeléctrico, también conocido como “efecto piezoeléctrico directo”, 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.

Para la comprensión del efecto piezoeléctrico habrá que considerar primeramente la estructura microscópica del material. Un material capaz de presentar una polarización en sus caras es considerado un material piezoeléctrico. La polarización del material ocurre en la estructura cristalina que lo compone; se trata de un momento dipolar, que 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.

Si se habla de un material con características piezoeléctricas naturales, tenemos que: “Cuando se aplica un esfuerzo, la suma de los desplazamientos de carga tiene una resultante que se traducirá al efecto piezoeléctrico.”[2 y 3]

Cuando hablamos de un material con características piezoeléctricas artificiales tenemos que: se trata de un material forzado a exhibir esas propiedades. Hablando particularmente de la cerámica piezoeléctrica, tenemos que 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. Para obtener actividad piezoeléctrica, los dipolos deben ser reorientados. Este nuevo posicionamiento en los dipolos se logra mediante la exposición del material cerámico a un fuerte campo eléctrico externo a altas temperaturas. Bajo estas condiciones polares los dipolos toman una dirección correspondiente a la dirección del campo de polarización. Finalizado el proceso, lo que se obtiene es llamado “polarización remanente del material cerámico”. El cuerpo cerámico se ha convertido, de forma permanente en un piezoeléctrico que es capaz de convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa. [4]

El efecto piezoeléctrico inverso ocurre si un campo eléctrico aplicado causa tal distorsión de la distribución de las cargas, tal que se generan distorsiones geométricas, manifestadas como esfuerzos mecánicos. [2]

## **1.2 Materiales Piezoeléctricos**

Hasta hoy, la piezoelectricidad ha sido asociada a muchos tipos de materiales; en sus inicios la piezoelectricidad fue percibida en minerales naturales, tales como el cuarzo, la turmalina, el topacio y la sal de Rochelle (tetrahidratotartrato de sodio y potasio, o  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). Todos los demás cristales piezoeléctricos, tales como el dihidrofosfato amónico [ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ], el ortofosfato de galio [ $\text{GaPO}_4$ ], y los óxidos complejos de galio y lantano, se obtienen en forma artificial. [5]

Los materiales piezoeléctricos son formas cristalinas naturales o sintéticas que no poseen un centro de simetría. Pueden ser agrupados en 2 grandes vertientes.

- I. Cristales piezoeléctricos naturales
- II. Cristales piezoeléctricos sintéticos.

### 1.2.1. Naturales.

Son aquellos materiales cristalinos que no poseen centro de simetría y que como su nombre lo indica, son encontrados en la naturaleza. Las propiedades piezoeléctricas exhibidas yacen intrínsecas. Los materiales piezoeléctricos naturales más comunes son el cuarzo, la turmalina, y la sal de Rochelle.

#### 1.2.1.1 Cuarzo

Pertenece a la clase de los silicatos. Los cristales completos de cuarzo 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.

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. [6]

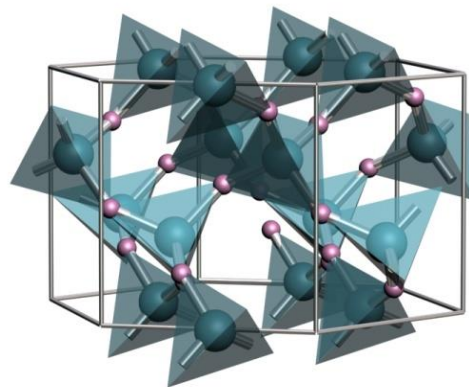


Figura 1.1 Estructura cristalina del Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). [6]

### 1.2.1.2 Turmalina.

La estructura de la turmalina está formada por anillos de tetraedros enlazados, con una relación Si:O = 1:3, que da lugar a una configuración cíclica cerrada  $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ . [7]

La turmalina pertenece a la clase de los silicatos/ciclosilicatos. Cristalizan en el sistema trigonal, suelen tener aspecto columnar alargado con un estirado 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 [7].

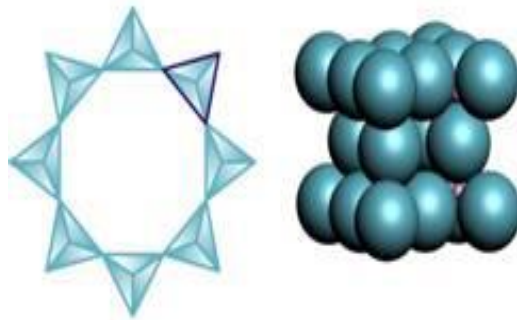


Figura 1.2 Estructura de Ciclosilicatos. Turmalina ( $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ). [7]

### 1.2.1.3 Sal de Rochelle.

Es una sal soluble en agua y ligeramente soluble en alcohol que posee la propiedad de la doble refracción. Es llamada la sal de Pierre Seignette, nombre de un farmacéutico de la Rochelle que la sintetizó en 1675. Cristaliza en los prismas con forma de rombo y su composición es  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  [7].

### 1.2.2. Sintéticos.

Cuando hablamos de los materiales piezoeléctricos sintéticos o artificiales, nos referimos a aquellos, particularmente cerámicos y polímeros, que en condiciones naturales no ostentan dicha propiedad; pero que son capaces de presentarla bajo la influencia de agentes externos.





Las cerámicas piezoeléctricas son cuerpos macizos semejantes a los utilizados en aislantes eléctricos; son constituidas de innumerables cristales ferroeléctricos microscópicos, siendo inclusive denominadas como policristalinas. [8]

En la actualidad el grupo dominante de materiales piezoeléctricos es el de los materiales consistentes en cristalitas con la estructura de la perovskita. Los ejemplos más representativos de los piezoeléctricos 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.

Además del grupo de los cristales y cerámicos, sintéticos, piezoeléctricos, se adhiere un tercer grupo que presenta la misma serie de propiedades piezoeléctricas, se trata del grupo de los polímeros. Los únicos polímeros piezoeléctricos existentes en el mercado son el Difluoruro de Polivinilo (PVDF) y sus copolímeros con Trifluoroetileno y Tetratrilfluoroetileno. [5]

En el desarrollo de este trabajo, se trabajará particularmente con los elementos piezoeléctricos cerámicos; Titanato Zirconato de Plomo. (PZT)

Las cerámicas tipo PZT, formadas por cristales ferroeléctricos presentan una simetría tetragonal, romboédrica o cúbica simple, dependiendo de la temperatura en que el material se encuentra. Bajo una temperatura crítica, conocida como temperatura de Curie, la estructura Perovskita, que componen los cristales ferroeléctricos, presenta la simetría tetragonal donde el centro de simetría de las cargas eléctricas positivas no coincide con el centro de simetría de las cargas negativas, dando origen a un dipolo eléctrico. La existencia de este dipolo provoca que la estructura cristalina se deforme en presencia de un campo eléctrico generándose un desplazamiento eléctrico cuando es sometida a una deformación mecánica, lo que caracteriza a los efectos piezoeléctricos inverso y directo respectivamente. [8]

Antes de mostrar los principales materiales piezoeléctricos, en cuanto a cerámicos se refiere, se vuelve necesario dar un listado a detalle de las constantes que la clasificación de los materiales piezoeléctricos comprende.

### **1.3. Constantes que Rigen las Propiedades de la Cerámica Piezoeléctrica.**

En sólidos ordinarios, el desplazamiento eléctrico puede ser considerado una función exclusiva del vector campo eléctrico "E" (N/C) y de las constantes dieléctricas ( $\epsilon$ ). La deformación mecánica "S" (m), una función exclusiva de las



tensiones mecánicas “T” (N) y las constantes elásticas (s). Dado a que la cerámica es un sólido, ésta se encuentra regida por la descripción anterior.

### 1.3.1 Coeficientes de acoplamiento k.

Definidos como el rendimiento del material al absorber a energía eléctrica suministrada por la fuente de excitación. [8]

### 1.3.2 Constantes piezoeléctricas d.

Las constantes piezoeléctricas establecen una proporcionalidad 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). En las ecuaciones 1.1 y 1.2 tenemos la definición diferencial de las constantes “d” a temperatura y campo eléctrico constante. [8]

$$d_{nij}^{\theta} = \left[ \frac{\partial D_n}{\partial T_{ij}} \right]_{E,\theta} \quad (C/N) \quad (1.1)$$

$$d_{nij}^{\theta} = \left[ \frac{\partial S_{ij}}{\partial E_n} \right]_{T,\theta} \quad \left( \frac{m}{V} \right) \quad (1.2)$$

Donde:

$d_{nij}$ = es la constante piezoeléctrica.

$\partial D_n$ = generación de cargas.

$\partial T_{ij}$ = Tensión mecánica aplicada. (N)

$\partial S_{ij}$ = Deformación (m)

$\partial E_n$ = Campo eléctrico aplicado (N/C)

### 1.3.3 Constantes dieléctricas K.

Establecen una proporcionalidad entre el deslizamiento eléctrico y el campo eléctrico aplicado. Las constantes dieléctricas son importantes porque determinan la capacitancia de la cerámica piezoeléctrica. En la ecuación 1.3 podemos ver la definición diferencial de la permisividad dieléctrica, de la temperatura y campo eléctrico constante, siendo  $K=e/e_0$ . [8]



$$\varepsilon_{mn}^{T,\theta} = \left[ \frac{\partial D_n}{\partial E_m} \right]_{T,\theta} \quad (C^2/Nm^2) \quad (1.3)$$

Donde:

$\varepsilon_{mn}$  = Permisividad

$\partial D_n$  = generación de cargas

$\partial E_m$  = Campo eléctrico

### 1.3.4 Constantes piezoeléctricas g.

Definidas como la razón entre las constantes d y  $\varepsilon$ , correlacionan la respuesta en tensión eléctrica del material a una tensión mecánica aplicada (de dimensión Vm/N). [8]

### 1.3.5 Constantes elásticas s.

Establecen una proporcionalidad entre la deformación y la tensión aplicada. Son las “constantes de muelle” del material. En la ecuación 1.4, se definen las constantes elásticas, con las cuales se puede calcular la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el material piezoeléctrico en cualquier dirección y polaridad así como estimar las variaciones dimensionales en función de presiones estáticas. [8]

$$S_{ijkl}^{E,\theta} = \left[ \frac{\partial S_{ij}}{\partial T_{kl}} \right]_{E\theta} \quad (m) \quad (1.4)$$

Donde:

$S_{ijkl}$  = Constantes elásticas (m)

$\partial S_{ij}$  = Deformación (m)

$\partial T_{kl}$  = Tensiones mecánicas (N)

### 1.3.6 Constantes de frecuencia N.

En geometrías, en las que tenemos un modo de vibración desacoplado, la constante de frecuencia se define como el producto de la frecuencia de resonancia por la dimensión en cuestión, pudiendo ser esta última el largo, diámetro o espesura. A partir de la constante de frecuencia podemos estimar la



frecuencia de resonancia para la misma geometría con dimensiones diferentes. [8]

### **1.3.7 Factor de calidad mecánico $Q_m$ y factor de disipación dieléctrico $\tan \delta$ .**

Constantes que determinan cuáles serán las pérdidas de energía del proceso de transducción. Es a partir de estos factores que se determina si el material es adecuado para aplicaciones de potencia tales como los sistemas de limpieza por ultrasonido. [8]

### **1.3.8 Temperatura de Curie.**

Es la temperatura crítica donde la estructura cristalina del material sufre la transición de fase de la simetría tetragonal para la cúbica. Es decir, la pérdida de sus propiedades piezoeléctricas macroscópicas. [8]

### **1.3.9 Límite de tracción dinámico.**

Es el límite máximo de tracción a que el material puede ser sometido dinámicamente sin romperse. [8]

### **1.3.10 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. [8]

## **1.4 Aplicaciones.**

La conversión eficiente de energía mecánica en energía eléctrica, utilizando materiales piezoeléctricos es de considerable importancia en sus aplicaciones y estos materiales tienen un gran campo de aplicación, desde su primera utilización estos materiales han producido grandes avances tecnológicos en diversos sectores como lo son las industrias, la medicina, la electrónica incluso en la vida diaria. Tienen un gran interés debido a sus aplicaciones potenciales en muchas áreas.

En este trabajo se presentan ejemplos de la aplicación que tienen actualmente este tipo de materiales.



En óptica los materiales piezoeléctricos son usados para la estabilización de imagen, microscopia electrónica, sistemas de auto enfoque, alineación y conexión de fibra de vidrio.

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. [19]

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. [17]

El uso de inyectores de combustible de los motores de combustión interna en el sector automotriz permite controlar con una enorme precisión los tiempos de inyección y la cantidad de combustible que se introduce en el motor, lo que redundará en mejoras en el consumo, prestaciones y rendimiento de los motores.

Otro caso de sensores en el sector automotriz es el de Sensores de presión de frenado, su misión consiste en suministrar valores de medición para el cálculo de las fuerzas de frenado. [9]

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.

Dentro del campo de la industria aeroespacial podemos encontrar los siguientes usos de materiales piezoeléctricos [9]:

- Sensores de nivel de líquido, como sistemas de combustible



- Sensores de proximidad
- Contadores
- Sistemas de captación de energía
- Componentes de manejo activo de vibraciones
- Accionamiento
- Transductores de flujo ultrasónicos
- Sistemas de orientación giroscopio

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. [10]

Otra de las importantes aplicaciones de un cristal piezoeléctrico es su utilización como sensor de vibración. Cada una de las variaciones de presión producidas por la vibración provoca un pulso de corriente proporcional a la fuerza ejercida. Se ha convertido de una forma fácil una vibración mecánica en una señal eléctrica lista para amplificar. Basta con conectar un cable eléctrico a cada una de las caras del cristal y enviar esta señal hacia un amplificador. [11]

Los componentes piezocerámicos son ampliamente usados en el sector de la medicina, se emplean en equipos para el diagnóstico de imagen y monitoreo de la frecuencia cardíaca a nivel fetal. También se han insertado transductores en miniatura en los vasos sanguíneos para registrar cambios periódicos en los latidos del corazón del paciente. [12]

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 terminales de un cilindro piezoeléctrico de cerámica pre tensionada, ajustado en este mecanismo. La carga de presión genera valores de



tensión y este voltaje genera una o varias chispas en el encendedor, las cuales encienden una mezcla de gas-aire.

En las guitarras eléctricas se emplea un pequeño sensor piezocerámicos en forma de placa o redondo, el cual se monta bajo la guitarra que recoge las vibraciones generadas por las cuerdas y las convierte en señales eléctricas

Entre las aplicaciones del día a día se encuentran las impresoras que para determinar la inyección de tinta o la salida de tinta utilizan sensores piezoeléctricos.

Dentro de las aplicaciones más aplicadas hoy en día son las que se explican a continuación.

#### **1.4.1 Sonares.**

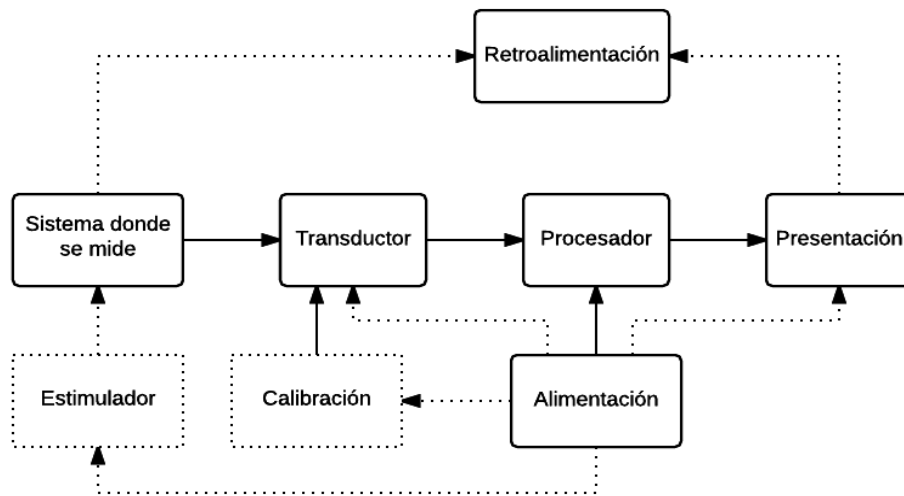
“Sound Navigation and Ranging”, mejor conocido como SONAR por sus iniciales, es un equipo tecnológico cuyo objetivo es encontrar objetos en el agua. Tiene un comportamiento similar al de un radar pero en un medio marino. [13]

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). [14]

#### **1.4.2 Transductores.**

Se le denomina transductor a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en otra señal correspondiente de forma física distinta. [15]

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. [15]



**Figura 1.3 Estructura general de un sistema de medida. [15]**

La figura 1.3, 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. 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. [16]

Se tiene una gran variedad de transductores y en la tabla 1.1 se muestra una clasificación de los tipos de transductores existentes con sus respectivas características.





**Tabla 1.1 Tipos de transductores. [16]**

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		
		Eléctricos		
Presión /fuerza	Electromecánicos	mecánicos		
		Piezoeléctricos		
		Resistivos		
		Galgas extensiométricas		
		Capacitivos		
Resistivos				

### 1.4.3 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. Los sensores, los actuadores y los interruptores se han usado para establecer límites de funcionamiento de las máquinas. [17]

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:  
Ventajas [18]:

- Alta sensibilidad y bajo coste.
- Alta rigidez mecánica (deformaciones experimentadas  $< 1\text{microm}$ ), 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  $260^{\circ}\text{C}$  y la turmalita  $700^{\circ}\text{C}$ ).
- La impedancia de salida de los materiales piezoeléctricos es muy baja.

#### 1.4.4 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.

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. [19]

#### **1.4.5 Piezoeléctrico como fuente de energía.**

Hoy en día se ha promovido el estudio de los materiales piezoeléctricos como una fuente alternativa para obtener energía eléctrica, por medio de diferentes iniciativas institutos de investigación como sectores empresariales se ha centrado en buscar aplicaciones útiles de este tipo de materiales para obtener energía eléctrica. [20]

Ejemplos de este tipo de proyectos son los que realizaron en el 2004 James Graham y Thaddeus Juscik empleando transductores piezoeléctricos alineados en la suela de un zapato lograron obtener 8.4 mW por el impacto del pie.

En el 2010 J. Paradiso y S. Schenk incorporaron un mini generador piezocerámico en el talón de un zapato para cargar una batería mientras se camina o corre esto gracias a circuitos adicionales. Con una eficiencia del 11%. [3]

Otro tipo de presentación de generadores piezoeléctricos ha sido la aplicación de discos piezoeléctricos en baldosas para obtener energía eléctrica.

La empresa Israelí *Innowattech* instaló generadores piezoeléctricos debajo de la superficie de una autopista a una profundidad de 20 cm aprovechando la energía mecánica producida por los automóviles que la transitan para generar energía eléctrica sin alterar de ninguna manera el ambiente. [21]

La empresa Israelí informo que sería capaz de generar hasta 500 kW en una hora de tráfico por cada kilómetro instalado con esta tecnología en cualquier autopista. La energía se utiliza para mantener encendidas las señales luminosas. [22]

En Japón la compañía de metro *East Japan Railway Company* instalo en las entradas de los torniquetes discos de materiales piezoeléctricos que aprovechan la energía generada por el paso de usuarios que ingresan a diario al metro.



La compañía ha informado que se consigue obtener 10 V por segundo con el sistema funcionando al 90 % de su capacidad. [23]

En Inglaterra ha surgido una empresa que ha sobresalido por el uso de baldosas piezoeléctricas, *Pavengen Systems* la empresa creada en el 2009 por Laurence Kemball-Cook y que se ha asociada con la empresa alemana Siemens, han desarrollados proyectos en Reino Unido y Europa instalando sus baldosas en estaciones de tren, de autobús, de metro, colegios y centros comerciales para alimentar anuncios digitales, sistemas de iluminación de baja potencia o zonas de Wi-Fi. [24]

Las baldosas Pavengen están diseñadas para que el 80 % de polímeros utilizados para su construcción sean reciclados y su revestimiento superior está hecho de goma reciclada de neumáticos, reduciendo al mínimo la huella de carbón. Las baldosas son resistentes al agua por lo que se pueden colocar en cualquier sitio en exteriores o interiores. [22 y 26]

Actualmente la empresa inglesa (pavengen) se encuentra trabajando en un sistema que sea capaz de alimentar directamente a la red eléctrica y que la duración de sus baldosas sea de mínimo 20 años. [25]

### 1.5 Modelo Matemático y eléctrico del Efecto Piezoeléctrico.

El dipolo eléctrico medio ( $P$ ) desarrollado por una tensión extensiva ( $T$ ) paralela a su eje de polarización será:

$$P = dT \quad (1.5)$$

Donde:

$d$  = constante de voltaje piezoeléctrica

$P$  = Dipolo

$T$  = tensión mecánica aplicada.

En función del campo eléctrico ( $E$ ) y el desplazamiento eléctrico la ecuación 1.6 queda de la siguiente manera:

$$P = D - \epsilon^T E \quad (1.6)$$



Donde:

$\varepsilon$  = Permitividad

E = campo eléctrico

D = Desplazamiento eléctrico

Relacionando las ecuaciones 1.5 y 1.6 obtenemos:

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (1.7)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\varepsilon^T} \quad (1.8)$$

Donde:

g = Constante de carga piezoeléctrica

$\varepsilon^T$  = Permitividad

T = Tensión mecánica

Ante la ausencia de tensiones mecánicas, el alargamiento medio experimentado por la cerámica piezoeléctrica, cuando está sujeto a un campo eléctrico viene dado por:

$$S = dE \quad (1.9)$$

$$S = gD \quad (1.10)$$

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T} \quad (1.11)$$

Donde:

d = Constante piezoeléctrica a tensión constante

g = Constante de carga piezoeléctrica

D = Desplazamiento eléctrico

S = Deformación Mecánica

E = Campo eléctrico

El alargamiento experimentado en un medio elástico sujeto a una tensión, sigue la ley de Hooke. [7]



$$S = sT \quad (1.12)$$

Donde:

T = Fuerza

s = Compliancia del medio

Generalmente sin embargo, la respuesta de una tensión piezoeléctrica media será una compleja interacción entre las ecuaciones 1.9, 1.10 y 1.11

Una aproximación será.

$$S = S^E T + dE \quad (1.13)$$

$$S = S^D T + gD \quad (1.14)$$

Donde  $S^E$  y  $S^D$  son específicas para un campo eléctrico constante.

En las ecuaciones 1.13 y 1.14  $S^E$  y  $S^D$  se relacionan de la siguiente forma:

$$S^D = (1 - K^2) S^E \quad (1.15)$$

Donde:

$$K^2 = \frac{d^2}{S^E \epsilon^T} \quad (1.16)$$

K = Factor de acoplamiento

d= Constante piezoeléctrica

S= deformación Mecánica

$\epsilon^T$  = Cte dieléctrica

De esta forma K es una cantidad cuantificable pero a frecuencias por debajo de la frecuencia de resonancia de un material cerámico K es una magnitud física: [26]

$$"K^2 = \frac{\text{energía convertida}}{\text{energía utilizada}}"$$

En la tabla 1.2 se muestran las constantes físicas y las variables definidas para el efecto piezoeléctrico con sus respectivas unidades en el SI:

**Tabla 1.2 Constantes piezoeléctricas [26]**

Símbolo	Nombre	Unidades	Comentario
$c$	Rigidez eléctrica	$N/m^2$	$c = 1/s$
$e$	Tensión piezoeléctrica	$N/mV$	$e = 1/g$
$\varepsilon$	Permitividad del medio	$F/m$	$\varepsilon = 1/\beta$
$d$	Deformación piezoeléctrica	$m/V$	$d = 1/h$
$s$	Compliancia del medio	$m^2/N$	-
$g$	Constante piezoeléctrico	$Vm/N$	-
$h$	Voltaje piezoeléctrico	$V/m$	-
$\beta$	Impermitividad del medio	$m/F$	-

### Modelo Eléctrico.

Un modelo isotérmico lineal que describe la relación entre la tensión y el esfuerzo mecánico, el campo y el desplazamiento eléctrico fue propuesto por V. W. Voight y ha sido estandarizado por la IEEE. [28 y 29]

Las ecuaciones que representan este modelo son las siguientes:

$$S_p = S_{pq}^E T_q + d_{kp} E_k \quad (1.17)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k$$

Donde:

S = Esfuerzo mecánico (N)

D = Desplazamiento eléctrico

T = Tensión mecánica (N)

E = Campo eléctrico (N/C)

$s^E$  = Deformación elástica en un campo eléctrico constante (m)

d = Constante de tensión piezoeléctrica (C/N) (m/V)

$\varepsilon^T$  = Constante dieléctrica bajo tensión constante. ( $C^2/Nm^2$ )

El modelo lineal de la ecuación 1.17 puede reducirse a un par de ecuaciones acopladas que pueden escribirse como:

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{ij}^E & d_{ij} \\ d_{ij} & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \quad (1.18)$$

Donde los subíndices  $i$  y  $j$  indican la dirección del campo generado en respuesta a una fuerza aplicada.

Para la descripción de los sistemas electromecánicos acoplados se emplean modelos de parámetros concentrados. La principal suposición hecha en el modelo de parámetros concentrados es que las dimensiones físicas del sistema son mucho más pequeñas que las escalas de longitud características de la que rige los fenómenos electromagnéticos, mecánicos o de acústica. Esto te permite que las variaciones temporales del sistema sean desacopladas. El acoplamiento piezoeléctrico ideal descrito por la ecuación 1.18 puede ser reescrito como: [27] y [28].

$$\begin{Bmatrix} \frac{\Delta t}{t} \\ \frac{Q}{A} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{F}{A} \\ \frac{V}{t} \end{Bmatrix} \quad (1.19)$$

Donde:

$\Delta t$ : es el cambio de espesor

$t$ : es el espesor del material.

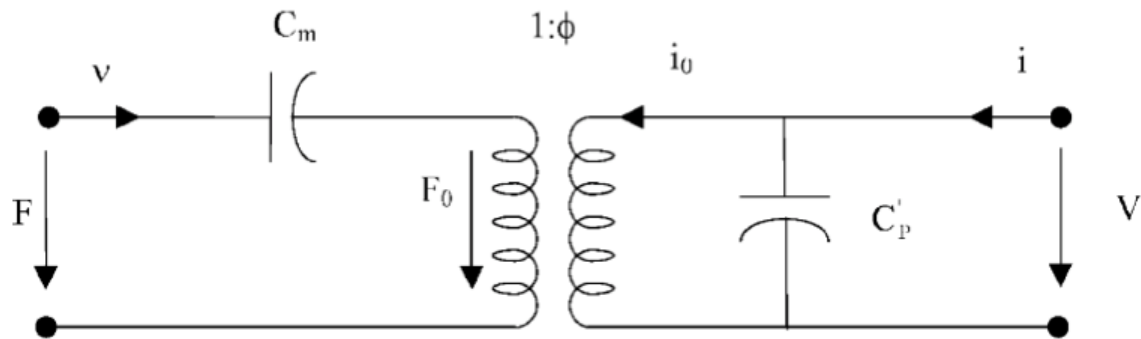
$Q$ = carga del material

$A$  = área del material

Suponiendo una condición de operación en estado estacionario senoidal y partiendo del modelo de la ecuación 1.19 puede ser representado por un circuito eléctrico mostrado en la figura 1.4

El circuito eléctrico que se muestra en la figura 1.4 es una representación idealizada del efecto piezoeléctrico, y es más preciso solamente para bajas frecuencias.





**Figura 1.4 Representación de acoplamiento piezoeléctrico [28]**

De donde se obtienen las ecuaciones 1.20 y 1.21

$$v = j\omega C_m F + j\omega dV \quad (1.20)$$

$$i = j\omega C_p V + j\omega dF \quad (1.21)$$

Donde:

$v = \Delta t/dt =$  Velocidad (m/s)

$i = dQ/dt =$  Corriente (C/s)

$C_m = s^E t/A =$  Capacitancia de cortocircuito (m/N)

$C_p = \varepsilon^T A/t =$  Capacitancia libre (C/V)

$V =$  Volts (V)

$F =$  Fuerza (N)

Las propiedades mecánicas de un elemento piezoeléctrico real, se pueden modelar por un sistema simple de masa resorte con amortiguamiento, como el que se muestra en la figura 1.5. La primera parte representa el caso ideal, la masa es un elemento que almacena energía y el amortiguador es responsable de las pérdidas mecánicas internas. [28 y 29]

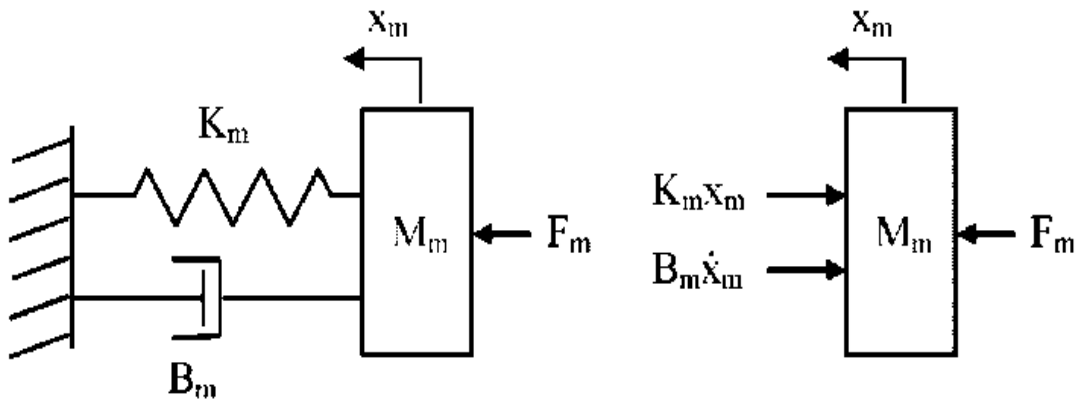


Figura 1.5 Modelo de agrupación de parámetros mecánicos. [28]

Usando la segunda ley de Newton en el diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 1.5, la ecuación de movimiento para este sistema se da por:

$$F_m = M_m \ddot{x}_m + B_m \dot{x}_m + K_m x_m \quad (1.22)$$

Donde:

$F_m$  = Fuerza externa (N).

$M_m$  = Masa efectiva (Kg).

$B_m$  = Coeficiente de amortiguamiento (N \* s/m).

$K_m$  = Constante del resorte =  $1/C_m$  (N/m).

$x_m$  = Desplazamiento de la masa (m).

$\dot{x}_m$  = Velocidad de la masa (m/s).

$\ddot{x}_m$  = Aceleración de la masa (m/s<sup>2</sup>).

Debido a que la impedancia mecánica está definida como la relación de la fuerza de la velocidad de un elemento, estos elementos pueden ser incorporados en la representación de ideal del acoplamiento piezoeléctrico como se muestra en la figura 1.6.a, reflejando los elementos mecánicos del modelo de parámetros concentrados que agrupan al lado eléctrico como se muestra en la figura 1.6.b, donde se producen los valores de los elementos del circuito eléctrico equivalente dados por: [27] y [28]



$$R_{em} = \phi^2 B_m \left( \frac{V^2}{N^2} \right) \left( \frac{N*s}{m} \right) = \left( \frac{V*s}{c} \right) = \text{ohms } (\Omega) \quad (1.23)$$

$$L_{em} = \phi^2 M_m \left( \frac{V^2}{N^2} \right) (kg) = \left( \frac{V*s^2}{c} \right) = \text{henry } (H) \quad (1.24)$$

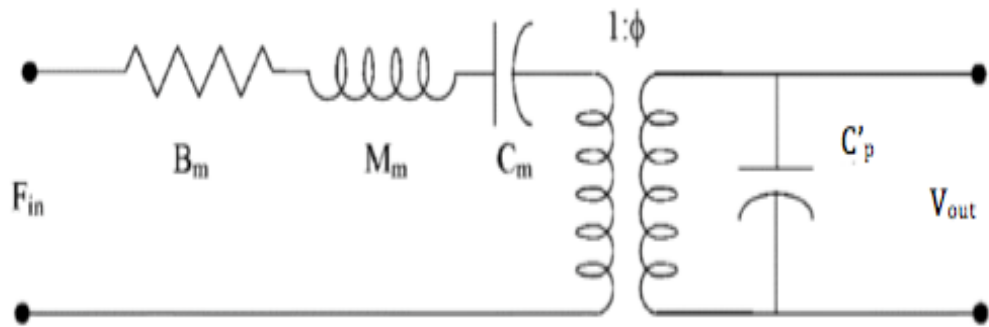
$$C_{em} = \frac{c_m}{\phi^2} \left( \frac{V^2}{N^2} \right) \left( \frac{m}{N} \right) = \left( \frac{c}{V} \right) = \text{farad } (F) \quad (1.25)$$

$$V_{in} = \phi F_{in} \left( \frac{V}{N} \right) (N) = (V) = \text{Volt } (V) \quad (1.26)$$

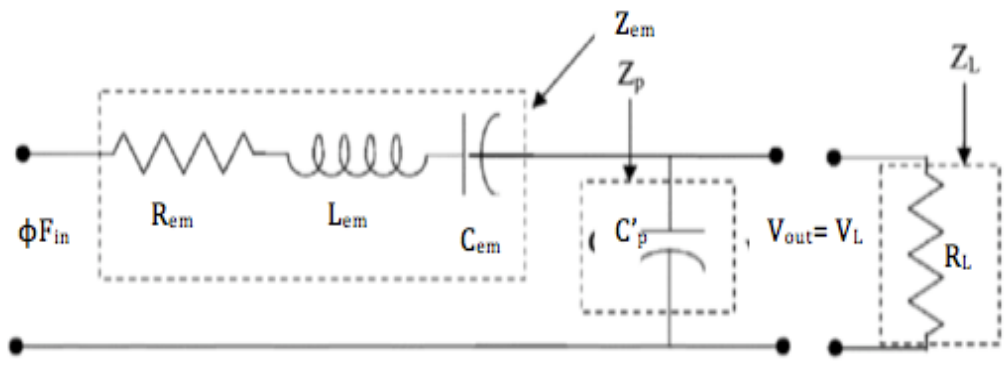
$$C_p = \left( 1 - \frac{d^2}{s^E \epsilon^T} \right) \frac{\epsilon^T A}{t} \left( \frac{C}{V} \right) (C) \quad (1.27)$$

El término extra  $Z_L$  que se muestra en la figura 1.6.b, representa la impedancia de carga conectada a la salida eléctrica del elemento piezoeléctrico. La carga se muestra como puramente resistiva, aunque eso no siempre es necesariamente el caso.

Cabe señalar que a este modelo todavía le faltan varios factores tales como la pérdida dieléctrica. Y recordar que es una representación simplificada lineal de lo que generalmente es un sistema no lineal mucho más complejo. Debido a que las cerámicas piezoeléctricas tienen muchos modos resonantes, cada una de ellas estaría caracterizada por un conjunto único de parámetros mecánicos. Además, se debe considerar que las constantes de los materiales piezoeléctricos no son constantes en absoluto ya que dependen de una manera no lineal de condiciones mecánicas y eléctricas. [27] [28].



(a)



(b)

Figura 1.6 Modelo general de un circuito de generación con piezoeléctricos. [28]



## Capítulo 2.

### Diseño y Construcción de un Generador Piezoeléctrico

#### 2.1 Introducción

En este capítulo se abordan cuestiones prácticas y una guía de construcción implícita; Como desarrollo subsecuente a los fundamentos teóricos y dando seguimiento a los objetivos planteados; se pretende dar a conocer el trabajo que representa el diseño y la construcción, etapa por etapa, de un generador piezoeléctrico; baldosa.

#### 2.2 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.

#### 2.3 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. [29] Esto se ve reflejado en la ecuación 3.1.

$$(68Kg)(9.8m/s^2)(0.05m) \left( \frac{2 \text{ pasos}}{\text{segundo}} \right) = 67 \text{ watt } (W) \quad (2.1)$$

## 2.4 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.

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.

## 2.4.1 Matemáticas Aplicables a los Parámetros Eléctricos.

Todo proyecto debe contar con una base de carácter matemático por más sencilla que ésta sea. El presente trabajo presenta una base matemática correspondiente a los valores de tensión generada, calculada a partir de la ecuación 2.2 y de manera teórica, los valores de Intensidad de corriente presentada por cada elemento piezoeléctrico, así como la potencia que éstos son capaces de generar.

### 2.4.1.1 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 [30].

La ecuación 2.2 define la tensión generada por una carga mecánica que actúa sobre un área determinada de un piezoeléctrico PZT [31].

$$V = \left( -g_{33} * h * \frac{f}{A} \right) = - \left( g_{33} * h * \left( \frac{f}{d^2 * \frac{\pi}{4}} \right) \right) \quad (2.2)$$

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:  $25 \times 10^{-3}$  Vm/N” [32]



#### **2.4.1.2 Intensidad de 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  $1\text{mA}$  [33].

#### **2.4.1.3 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 número 2.3.

$$P = (V)(I) \quad (2.3)$$

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)

#### **2.4.2 Matemáticas Aplicadas a los Parámetros Mecánicos.**

Así como se cuenta con un desarrollo matemático referido a los parámetros eléctricos; de la misma manera, se debe fundamentar la operación del generador, cuyos pilares son los elementos piezoeléctricos, con base en las propiedades mecánicas aplicables a éstos.

##### **2.4.2.1 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 2.4.





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 [34].

$$f = m * g \quad (2.4)$$

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>.

#### 2.4.2.2 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. [35]

$$A = \frac{(\text{Área del Cerámico}^2 AC)(\pi)}{4} \quad (2.5)$$

Donde:

A= área efectiva de acción del disco

$\pi$ = 3.1416 Cte.

AC= área total del cerámico  $m^2$

### 2.5 Cálculo y Pruebas de los Parámetros Eléctricos y Mecánicos.

Una vez fundamentados, matemáticamente hablando, los parámetros eléctricos y mecánicos, hay que comprobar esta serie de valores mediante el propio cálculo; y una vez establecidos los valores, no queda más que verificarlos de manera práctica mediante la medición de la misma.

Éste apartado muestra el cálculo de los parámetros eléctricos y mecánicos mencionados en el apartado 2.4 y sub-secciones.

#### 2.5.1 Cálculo de la Tensión por Unidad de Generación.

A partir de las bases teóricas que se presentaron en el apartado 2.4, se desarrollaron los cálculos correspondientes a la tensión generada por cada baldosa a partir de la fuerza aplicada a éste y a partir de las características propias de los dispositivos piezoeléctricos en uso. Estos cálculos son referidos



exclusivamente a los valores de tensión y se desarrollan con el objetivo de exhibir en el apartado correspondiente los valores de tensión que teóricamente deben ser presentados por cada baldosa.

Los cálculos correspondientes a la tensión generada se pueden obtener por la ecuación 2.2.

El cálculo de la tensión generada, dada de la siguiente expresión (Ecuación 2.2), a partir de ésta se hace el cálculo de la tensión.

$$V = - \left( g_{33} * h * \left( \frac{f}{d^2 * \frac{\pi}{4}} \right) \right) \quad (2.2)$$

Asignando los valores de la tabla 2.1 a cada una de las variables de la ecuación 2.2.

**Tabla 2.1 Datos del material piezoeléctrico. [8]**

Variable	Valor
Constante piezoeléctrica ( $g_{33}$ )	$25 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$
Grosor del piezoeléctrico ( $h$ )	$0.33 \text{ mm}$
Fuerza aplicada al cerámico ( $f$ )	$784 \text{ N}$
Diámetro efectivo del piezoeléctrico ( $d$ )	$20 \text{ mm}$

Todos estos datos son mencionados en la sección 2.4. Sustituyendo éstos valores, damos forma a la ecuación y obtenemos la tensión generada en el disco piezoeléctrico:

$$V = \left( 25 \times 10^{-3} (\text{Vm/N}) * 0.00033 \text{ m} * \left( \frac{784 \text{ N}}{0.02 \text{ m}^2 * \frac{\pi}{4}} \right) \right) = 20.58 \text{ V} \quad (2.7)$$

## 2.5.2 Ensayos Eléctricos en el Elemento Piezoeléctrico.

Se debe mencionar; que previo a concretar el ensamble final de la primera, y posteriormente, de las subsecuentes *baldosas*; se realizaron 2 ensayos eléctricos básicos independientes sobre un muestreo de elementos piezoeléctricos. Los ensayos ejecutados sobre cada elemento tienen como fin evaluar y verificar las propiedades eléctricas que teóricamente éstos deben presentar. Los ensayos realizados sobre los elementos piezoeléctricos son las que se enlistan a continuación:

- a) Tensión generada por impulso directo.
- b) Corriente generada por impulso directo.

### 2.5.2.1. Tensión generada por impulso directo.

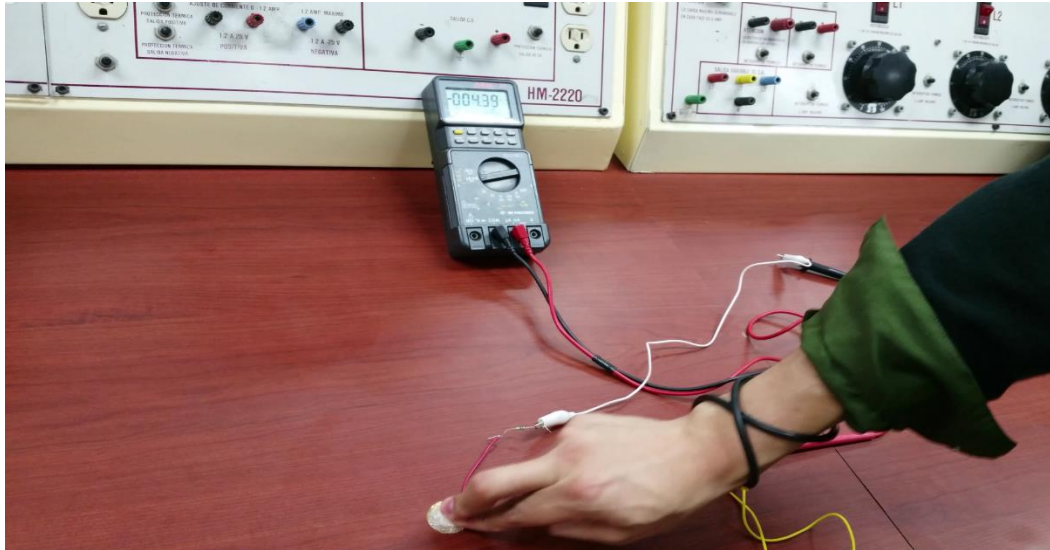
El valor de tensión generada, presentada por cada elemento piezoeléctrico oscila entre los 13.24 y 17.11 volt. La tensión real en cada disco se obtuvo conectando un multímetro digital en las terminales cerámica y metálica propias de dicho disco; y a su vez, ejerciendo sobre él una fuerza mecánica capaz de deformarlo. La Figura 2.1 muestra la tensión generada por un disco piezoeléctrico al ser deformado con la mano.



Figura 2.1 Medición de tensión en un disco piezoeléctrico.

### 2.5.2.2. Corriente generada por Impulso directo.

La corriente generada por cada uno de los discos debido al impulso mecánico directo equivale a  $11.49 \mu\text{A}$ . Véase Figura 2.2.



**Figura 2.2 Medición de corriente en un disco piezoeléctrico.**

En el apartado “2.5”, sección “2.5.1” se utiliza la ecuación “2.2” para el desarrollo del cálculo de la tensión que puede ser generada por los elementos piezoeléctricos bajo la acción de una carga mecánica. Recabando las propiedades teóricas que éstos poseen, y haciendo una sustitución de las mismas en las variables de la ecuación, tenemos que idealmente los elementos piezoeléctricos, aplicándoles un peso aproximado de 80Kg, deben ser capaces de presentar en sus terminales una diferencia de potencial de aproximadamente 20.58 V. Este resultado difiere completamente al obtenido de manera experimental; cuando se somete a los piezoeléctricos a ese nivel de deformación, obtenemos una lectura máxima de entre 13.24 y 17.11 V.

Esto indica que existe una serie de factores que pueden alterar o disminuir el rendimiento de estos elementos. Como por ejemplo: un error en la aplicación de la fuerza de deformación, una sobreprotección mecánica, un error de medición, defectos de fábrica etc. Para corroborar algunos de los puntos mencionados anteriormente se muestra una par de tablas que comparan errores en la medición y defectos de fábrica.

A continuación se muestra la tabla 2.2 que muestra la variación de tensión que los elementos piezoeléctricos presentan cuando son sometidos a los mismos niveles de deformación. Éste estudio se realizó con un muestreo de 5 discos.



**Tabla 2.2 Medición de la tensión generada por disco con un único peso.**

	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 4	Disco 5
Peso aplicado	V. generada	V. generada	V. generada	V. generada	V. generada
83Kg	14.17 V	8.95 V	12.43 V	12.77 V	16.01 V

Observando los resultados anteriores, es posible extender un veredicto. Efectivamente, se pueden apreciar defectos de fábrica en los elementos piezoeléctricos. Estos defectos se le atribuyen al cerámico, ya que como se observa, el disco 2 y el disco 3 presenta los niveles de tensión más bajos en comparación a los otros 3 discos; siendo que los 5 discos estuvieron sometidos al mismo peso.

La tabla 2.3 presenta un estudio más completo, complementario al de la tabla 2.2. En ésta se comparan los niveles de tensión generados por los discos al verse afectados por diferentes pesos.

**Tabla 2.3 Medición de la tensión generada por disco con diferentes pesos.**

	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 4	Disco 5
Peso aplicado	V. generada	V. generada	V. generada	V. generada	V. generada
66Kg	6.72	5.75	5.51	9.68	12.25
67Kg	8.95	11.4	11.2	11.9	7.76
80 Kg	11.34	8.12	7.24	12.39	10.40
95Kg	12.11	4.72	3.36	14.13	10.77
110Kg	4.10	2.01	1.55	6.68	3.35

Podemos observar que al aplicarle diferentes pesos, de igual manera el disco 2 y 3 continúan presentando los más bajos niveles de tensión. Esto habla de un defecto de fábrica para esos 2 discos.

Si atribuimos defectos de fábrica a un muestreo de 5 discos, debemos considerar que posiblemente alguna de las baldosas tenga entre sus filas elementos con defectos de fabricación; lo cual se traduciría en una baja generación de tensión.

Los errores en la medición de tensión se exhiben en la tabla 2.4; donde se hace la comparativa entre las lecturas que arrojan un multímetro “BK Precisión” y un multímetro “Tulmex 16-61”. Estas lecturas se hacen bajo una deformación proveniente de un peso aplicado de 70Kg



**Tabla 2.4 Comparación de medición de tensión con 2 multímetros.**

	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 4	Disco 5
Multímetro	V. generada	V. generada	V. generada	V. generada	V. generada
BK Precision	10.12	9.17	5.54	10.39	11.40
Tulmex 16-61	10.09	9.17	5.46	10.42	11.29

Con los resultados obtenidos, observamos que las magnitudes de tensión registradas por uno y otro instrumento, varían por escasas milésimas de volt. Sin embargo, aunque ambos resultados son confiables, daremos preferencia a la exactitud superior, mostrada por el BK Precision.

Con estos valores, podemos considerar, que al igual que como existen defectos de fábrica, también tenemos, como un factor adicional, los errores en la medición.

## **2.6 Ensamble del Generador Piezoeléctrico.**

El armado o ensamblaje total de éste generador es la unión de lo que llamaremos baldosas piezoeléctricas. Visto de otra manera, el ensamble total radica en la operación conjunta de las todas partes del generador.

### **2.6.1 Construcción de la primera baldosa piezoeléctrica.**

Cada baldosa piezoeléctrica, se encuentran formadas por un total de 52 elementos piezoeléctricos cada una.

La construcción de cada baldosa comprende la elección de la base del asentamiento general, el asentamiento particular para cada uno de los discos piezoeléctricos, la adhesión de éstos a la base, la interconexión de los mismos, así como la protección mecánica que se ostenta en cada uno.

#### **2.6.1.1 Base**

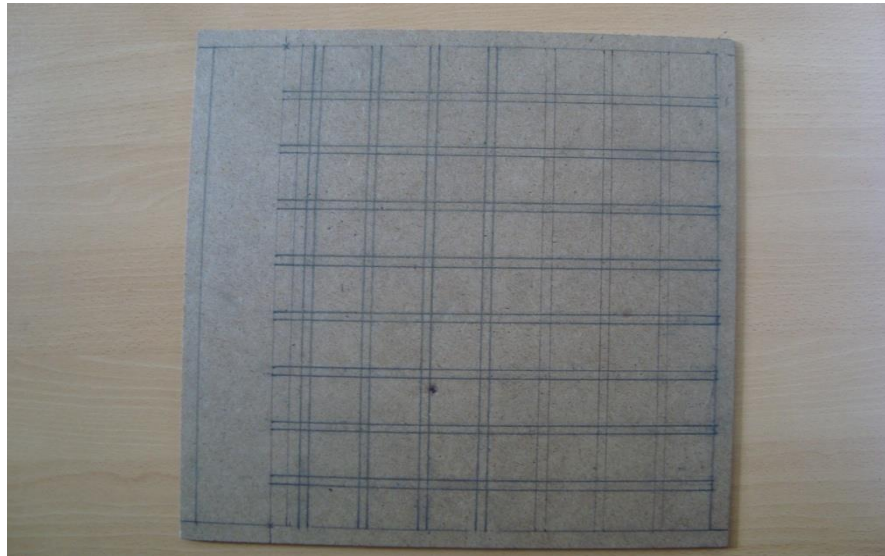
La base de las baldosas, por requerimientos propios del proyecto, debe ser algún material que ostente una alta resistencia mecánica, ya que por cómo se presentan las baldosas; éstas, estarán expuestas a una gran cantidad de deformaciones mecánicas.

Las baldosas, tienen como base un panel fibracel/Cholguan; se trata de un tablero de fibra de madera prensado a altas temperaturas, de espesor delgado, carente de aglomerantes y una considerable resistencia a la humedad, fácil de

trabajar, liviano, flexible, homogéneo, de alta densidad, y gran dureza superficial [36].

La placa fibracel seleccionada tiene unas dimensiones de 30 cm x 30 cm por cada lado y un espesor de 4mm. Figura 2.3.

Sobre la base, se deben trazar las posiciones pertinentes para guiar la futura colocación de los asentamientos particulares de cada uno de los discos piezoeléctricos. El trazado guía es una cuadrícula que presenta las siguientes dimensiones: a) 1cm de margen con respecto a los bordes de la placa fibracel, b) 2.7cm para los asentamientos particulares, y c) 0.5cm entre el trazado de cada espacio para asentamiento. Véase Figura 2.3.



**Figura 2.3 Placa fibracel con el trazado de las guías para asentamiento.**

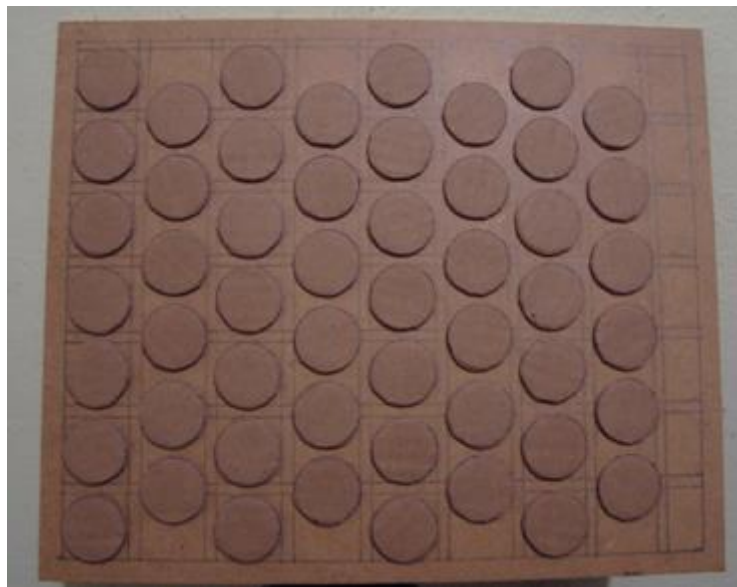
### **2.6.1.2 Asentamientos individuales**

El elemento que se describe aquí como el asentamiento individual, es el material que se emplea como un amortiguador para el disco piezoeléctrico.

El disco piezoeléctrico, debido a pruebas de resistencia mecánica, no puede quedar directamente adherido a la superficie lisa y rígida del panel fibracel; Si éste se colocara directamente sobre el panel, al aplicarle una carga mecánica, se presentará una fractura directa en el material cerámico. Para evitar la fractura en el material antes mencionada, se antecede un disco de cartón, es decir, entre las superficies de la placa fibracel y el elemento piezoeléctrico se intercala un disco

de cartón de 28mm. Éste disco brinda el soporte necesario para evitar el contacto directo del disco con el panel y por lo tanto la fractura del material.

El cartón es un material que está formado por varias capas de papel. Dada ésta característica, el cartón es naturalmente más resistente, grueso y duro [37].  
Figura 2.4.



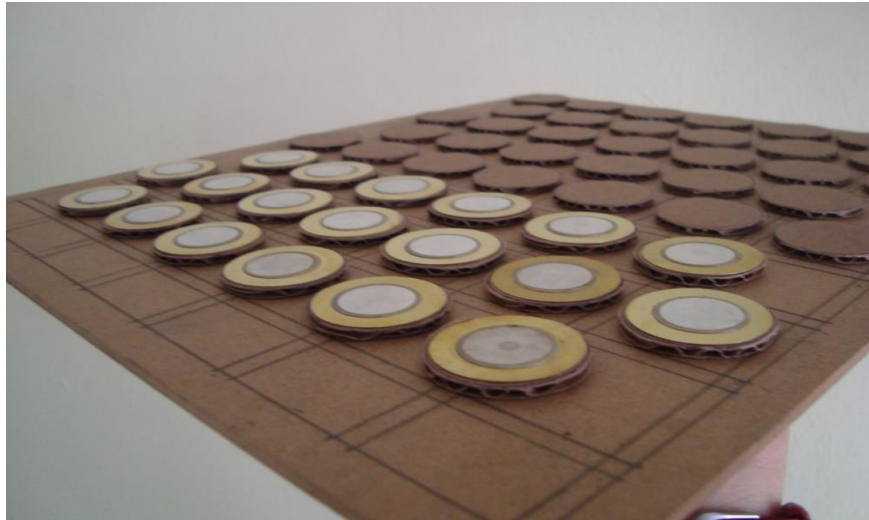
**Figura 2.4 Colocación de los asentamientos individuales a partir del trazado de guías.**

### **2.6.1.3 Adhesión de los elementos.**

La adhesión de los discos de cartón a la placa fibracel y la adhesión de los elementos piezoeléctricos a los discos de cartón se concretó empleando a los “súper-pegamentos” (Cianoacrilato de metilo). El cianoacrilato de metilo es una resina que polimeriza en presencia de agua formando largas y fuertes cadenas, que unen las superficies unidas entre sí, por lo que no necesita ni presión ni calor para adherir dos o más objetos entre sí [38].

Con el uso de los Cianoacrilatos se consigue una fuerte unión de los elementos componentes de la baldosa. En la figura 2.5 se muestra la adhesión de los asentamientos y de los elementos piezoeléctricos.



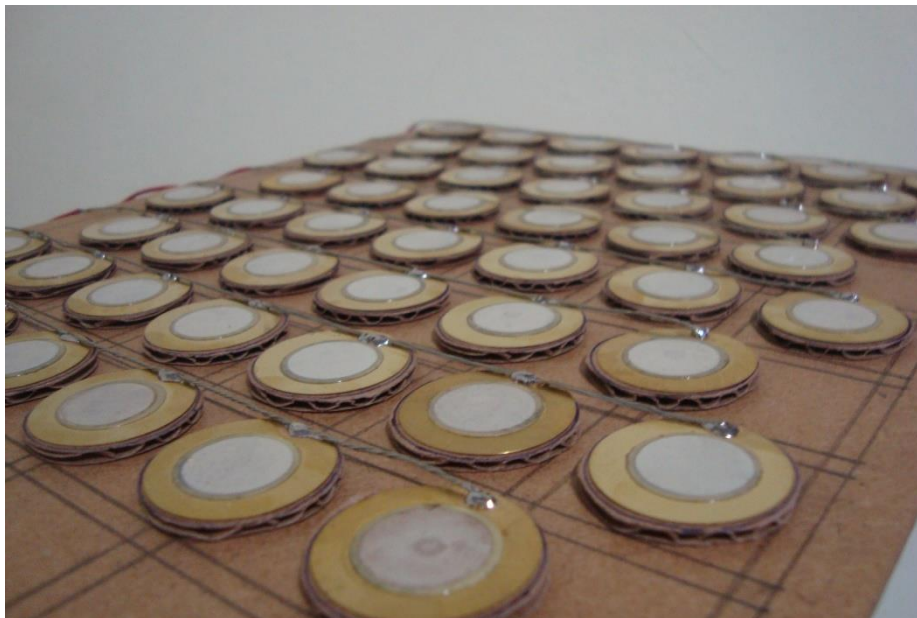


**Figura 2.5 Adhesión de los elementos piezoeléctricos.**

#### **2.6.1.4. Interconexión de los elementos piezoeléctricos.**

La sub-sección “2.6.1.2” toma importancia en ésta, cuando es la interconexión de los elementos piezoeléctricos uno de los mayores factores causante de fracturas y fallas en el propio piezoeléctrico. La carga mecánica aplicada a los discos piezoeléctricos toma importancia, en cuanto a fallas se refiere, cuando se ve concentrada en un punto, el punto de unión o interconexión de los elementos piezoeléctricos.

La interconexión de los elementos se realiza en paralelo. Cada baldosa costa de un total de 52 elementos piezoeléctricos distribuidos en hileras de 6 y 7 elementos dispuestos aleatoriamente. Los elementos de cada hilera se conectan en paralelo; dejando las terminales de salida libres, dispuestas para una conexión más. La figura 2.6 muestra la interconexión entre los discos piezoeléctricos.



**Figura 2.6 Interconexión de los elementos piezoeléctricos.**

#### **2.6.1.5 Protección mecánica de la baldosa.**

En la sub-sección “2.6.1.2”, la protección mecánica entre superficies para los discos ante cargas mecánicas que ocasionen fallas, se habla del soporte entre la superficie superior del panel fibracel y la superficie inferior del disco piezoeléctrico. Para complementar la protección, es decir, para proteger en su totalidad al elemento piezoeléctrico; éste se aísla, de la acción destructiva de la fuerza mecánica, mediante una cobertura, en toda su superficie y puntos de conexión, de pegamento termo fusible. Silicona.

Se selecciona la silicona debido a que ésta posee una resistencia a la tracción de 70 Kg/cm<sup>2</sup>. [39].

La silicona es colocada en doble capa sobre todos los elementos del sub-generator, dejando una cobertura que es capaz de brindar una protección mecánica lo suficientemente grande como para resistir los impactos a los que serán sometidos cada uno de los sub-generadores; en la figura 2.7 se muestra la silicona colocada en la baldosa para su protección.



**Figura 2.7 Protección mecánica dada a la baldosa mediante la aplicación de silicona.**

#### **2.6.1.6 Baldosa ensamblada.**

La conjunción de los requerimientos expuestos desde la sub-sección “2.6.1.1” hasta la “2.6.1.5”, aplicables a las baldosas, permiten presentar el producto final.

La baldosa número 1, se exhibe terminada en la figura 2.8.



**Figura 2.8 Baldosa ensamblada.**



## 2.7 Baldosa en Operación. Tensión en terminales.

La operación de la baldosa, hasta el momento, se limita a presentarse como un dispositivo de generación eléctrica; completo, es decir, observar que el producto planteado en la sub-sección “2.6.1.6” es capaz de generar y presentar en las terminales de cada uno de sus rieles, una diferencia de potencial similar, o de igual magnitud a la que se presentó en la sub-sección “2.5.2.1”.

La baldosa completamente ensamblada es sometida a ensayos, tanto eléctricos como mecánicos. En la etapa final de su construcción, se somete a los ensayos que por diseño debe aprobar: a) Resistencia a la deformación mecánica y b) Generación de tensión en terminales, producto de la propia deformación a la que es sometido. En la tabla 2.5 se muestran los datos correspondientes a una serie de 5 ensayos de generación de tensión y resistencia a la deformación, con sus respectivos resultados, aplicadas a la baldosa piezoeléctrica. Los ensayos se realizaron con ayuda de 5 voluntarios que presentaban diferentes IMC; éstos sometieron a la baldosa a diferentes esfuerzos mecánicos, es decir, a diferentes niveles de deformación, que a su vez, originaron los valores de tensión ahora presentados.

**Tabla 2.5 Medición de la tensión por riel.**

NO. DISCOS	NO. RIEL	TENSIÓN GENERADA EN LAS TERMINALES DEL RIEL, DEFORMADO POR DIFERENTES PESOS.				
		68Kg	70Kg	83Kg	95Kg	110Kg
7	1	11.62	23.04	23.04	11.30	18.45
6	2	5.42	20.21	15.01	10.47	11.72
7	3	4.47	13.07	18.07	16.07	20.34
6	4	10.38	22.05	24.03	24.00	14.26
7	5	6.02	19.8	14.32	16.47	15.01
6	6	5.50	17.20	18.07	7.02	10.86
7	7	71.35	14.31	18.09	11.70	5.82
6	8	6.70	12.15	12.03	6.90	10.81

Observando los resultados mostrados en la tabla 2.5; podemos comprobar que efectivamente, cuando un esfuerzo mecánico se ve aplicado; se presenta una diferencia de potencial entre las terminales de la baldosa.



En la figura 2.9 se observan las tensiones generadas variando el peso al que son sometidas las baldosas, se observa que los pesos de 83kg y 95kg obtienen el mayor pico de tensión, superando los valores registrados por la persona de 110kg.

Someter a la baldosa a éstas deformaciones, aparte de asegurar su funcionamiento como generador, muestra que posee la resistencia mecánica suficiente para trabajar con un peso promedio y superiores.

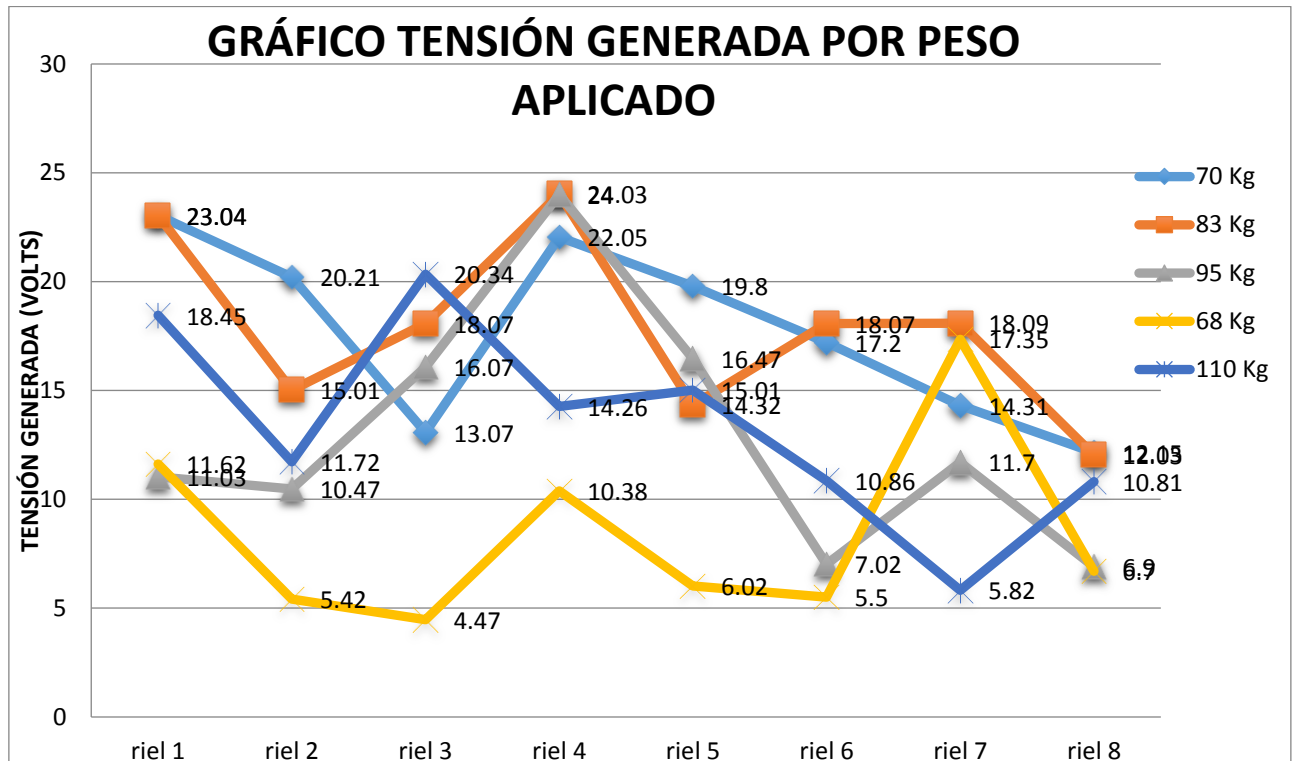


Figura 2.9 Grafica de la tensión generada por la baldosa variando el peso.



## Capítulo 3.

# Implementación del Generador Piezoeléctrico para Obtener Energía Eléctrica

### 3.1 Introducción

En este capítulo se enfoca al desarrollo del factor electrónico y a su operación conjunta con la baldosa piezoeléctrica, previamente construida. De manera similar a un capítulo anterior, exhibimos el trabajo de diseño y construcción, de un circuito electrónico que permite aprovechar en mayor grado a la baldosa. Como prueba fiel de la operación, se presenta un listado y desarrollo y descripción de los ensayos a los que se someten la baldosa y el circuito electrónico.

### 3.2 Diseño de los sistemas electrónicos para transmitir y almacenar la energía eléctrica generada por los piezoeléctricos.

Éste apartado lleva éste nombre, debido a que se debe hacer uso de la electrónica para llevar al 100% de su operación total a las baldosas piezoeléctricas.

Como se ha visto, la mayor fortaleza que presenta la baldosa piezoeléctricas es la propia generación de tensión, es decir, es un elemento que genera, comparativamente, altos niveles de tensión pero una muy baja corriente. La deficiencia que éste presenta en cuanto a la generación de corriente, es lo que obliga a hacer uso de la electrónica. Hay que recordar que para la operación de cualquier dispositivo eléctrico, no solo basta contar con la presencia del nivel de tensión requerido, si no también habrá que considerar la corriente demandada por éste. La baldosa piezoeléctrica es capaz de proveer los niveles de tensión, pero difícilmente respaldará los niveles de corriente. Esta desventaja nos obliga a hacer uso de elementos que nos ayuden a fortalecer dicha debilidad.

#### 3.2.1 Dispositivos electrónicos utilizados.

Los materiales electrónicos empleados en la elaboración del circuito electrónico como sus respectivos datos y características se muestran en la tabla 3.1. Es de suma importancia conocer el funcionamiento de cada elemento empleado para comprender la función que tendrán dentro del circuito electrónico.



Los cálculos utilizados para el dimensionamiento de las resistencias del circuito son los siguientes:

Para los valores que se tienen en los estándares del proyecto; contamos con una tensión de 15 volt, la carga indicada por las tiras leds es de 12 watt alimentadas a 12 volt y  $\beta = 30$ .

Para el cálculo de la corriente del colector; partiremos de la ecuación 3.1.

$$P = V * I \quad (3.1)$$

Despejando la corriente queda la ecuación 4.2 indicando que será la corriente del colector la que se calculara.

$$I = I_c = \frac{P}{V} \quad (3.2)$$

Sustituyendo los valores, se obtiene una corriente de 1 A.

$$I_c = \frac{12 \text{ watts}}{12 \text{ volts}} = 1A$$

Ahora usaremos el parámetro  $\beta$  (beta); el más bajo para asegurar la saturación del transistor. Usaremos la ecuación 3.3 para calcular la corriente en la base del transistor.

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{1A}{30} = 0.033A \quad (3.3)$$

Esta entonces,  $I_b$ , es la corriente necesaria para que el transistor se sature y se active permitiendo la carga. Ahora bien, para el cálculo de la  $R_b$ , se realiza un mallado en el circuito de la base; siendo éste:

$$15Volts = R_b I_b - V_{bc} \quad (3.5)$$

Despejando  $R_b$  de la ecuación 4.5 y sustituyendo valores obtenemos el valor de la resistencia en la base.

$$R_b = \frac{(15-0.7)}{I_b} = \frac{(15V-0.7V)}{0.033A} = 433ohms$$

El resistor colocado en el colector; no tiene otro fin que limitar el paso de corriente al circuito.

$I_c \cong I_e$ . (Corriente de colector = corriente de emisor)

$I_c = \beta I_b$ . (corriente de colector = (beta \* corriente de base)

$$I_c = (30)(0.033A) = 0.99A.$$

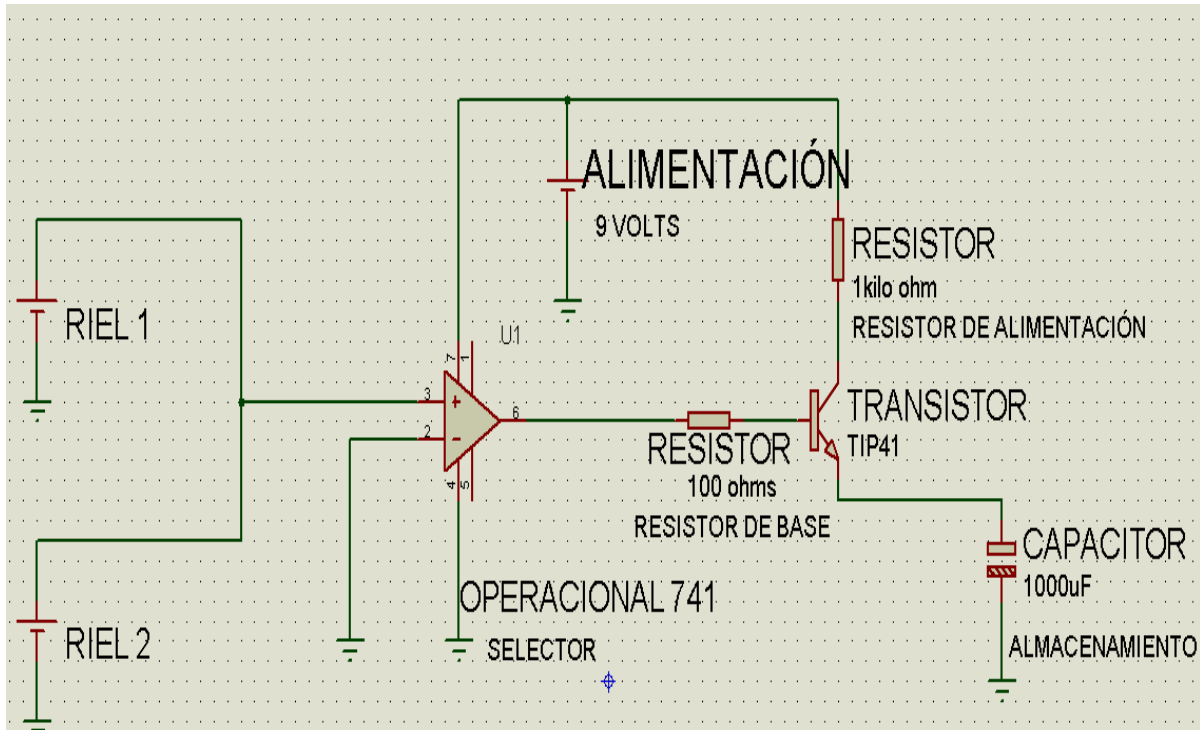
**Tabla 3.1 Lista de materiales electrónicos empleados en el circuito electrónico para la transmisión y almacenamiento.**

Dispositivo	Imagen	Datos
Material piezoeléctrico		Medidas:27 mm
		Tensión min:3 V
		Tensión max:20 V
Transistor NPN TIP 41C		Tensión emisor-base= 5V
		Corriente colector = 6 A
Capacitor		Capacitancia:1000 µF
		Tensión: 16 V
		Corriente:50 µA
Resistencias		R=1 kΩ. A ½ watt R=100 Ω. A ½ watt



### 3.2.2 Conexión del circuito.

En la figura 3.1 se muestra el circuito electrónico para transmitir y almacenar la energía obtenida de las baldosas piezoeléctricas.

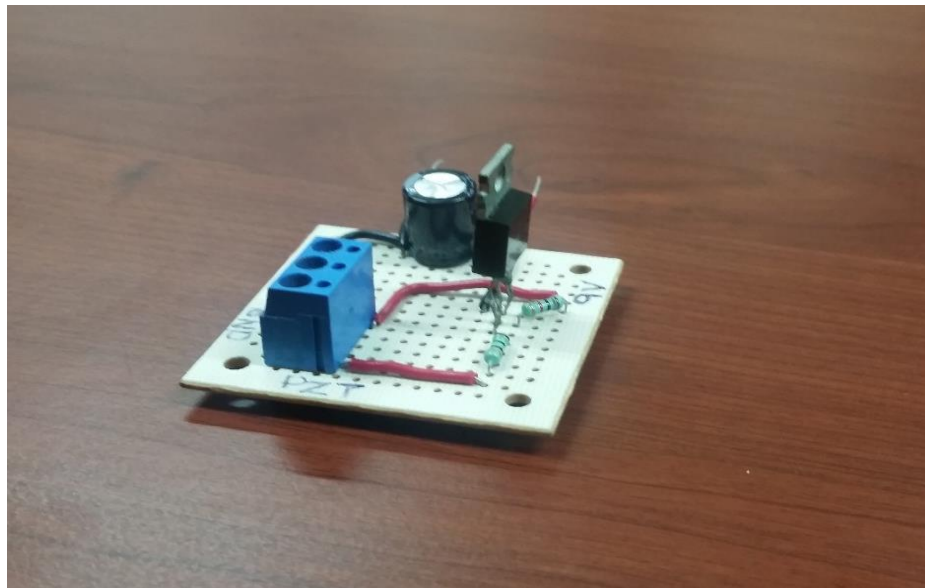


**Figura 3.1** Circuito electrónico para transmitir y almacenar.

Todas las conexiones se realizaron de acuerdo a la información obtenida de las hojas de datos de cada dispositivo electrónico empleado.

### 3.3 Almacenamiento de Energía.

Tomando como base el circuito electrónico de la sección 3.2, se procedió a la elaboración física del circuito, todos los elementos se ensamblaron en una tabla fenólica perforada.



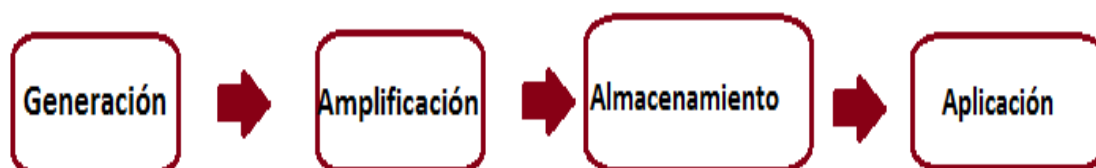
**Figura 3.2 Circuito Físico**

La figura 3.2 muestra los elementos electrónicos ensamblados en una pequeña placa.

Será necesario un circuito de almacenamiento por cada dos hileras de discos piezoeléctricos en las baldosas.

La finalidad de esta sección es mostrar el proceso de almacenamiento de la energía eléctrica obtenida de las baldosas piezoeléctricas, para su uso posterior.

Para ilustrar el proceso, se seguirá la lógica del diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3 Diagrama de bloques del circuito electrónico.**

La parte de la generación la componen el conjunto de baldosas piezoeléctricas que se mencionan en la sección 2.6.1.6.

La amplificación se lleva a cabo por medio de los TIP 41.

La energía se almacena en un capacitor que está conectado al emisor del TIP 41.

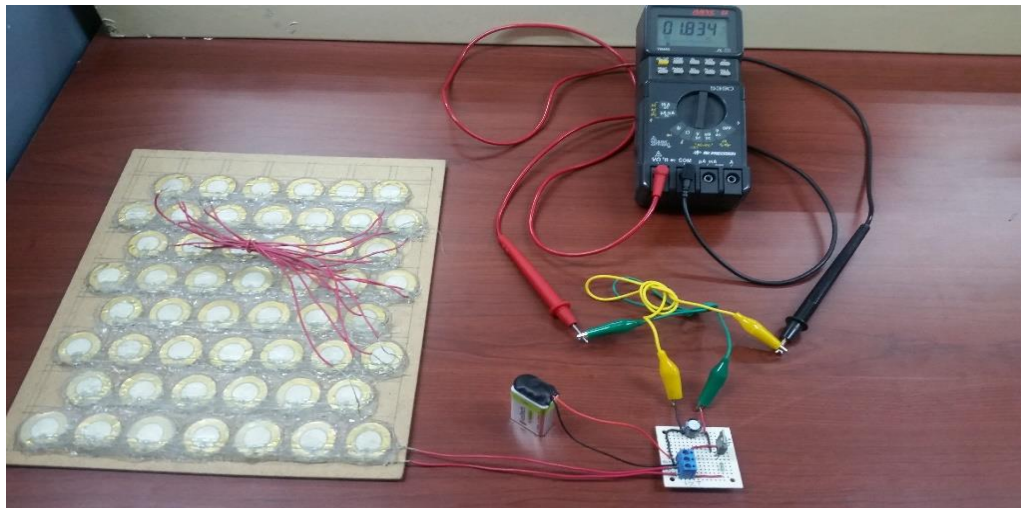
Por último la energía almacenada en el capacitor será empleada para alimentar tiras de led.

En la figura 3.4 se muestra la conexión de la tablilla con los elementos electrónicos a la baldosa piezoeléctrica para el almacenamiento de la energía.



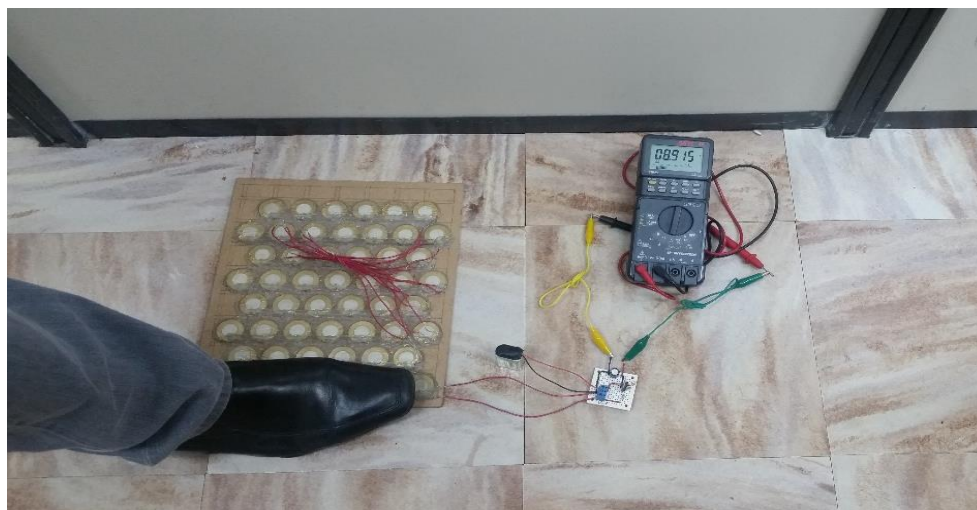
**Figura 3.4 Conexión circuito electrónico a la baldosa.**

La figura 3.5 muestra en estado de reposo el circuito electrónico, es decir, no hay generación y la tensión que se muestra en el multímetro es debido a que existe una conexión a una batería de 9 V que alimenta al TIP 41 y este se encuentra consumiendo.



**Figura 3.5 Estado de reposo del circuito electrónico.**

En la Figura 3.6 se muestra en el multímetro la tensión que existe en el capacitor, lo que indica que existe generación por parte de las baldosas piezoeléctricas debido a la deformación de los piezoeléctricos por parte de la fuerza mecánica ejercida por la pisada de una persona.



**Figura 3.6 Almacenamiento de energía eléctrica.**

### **3.4 Aplicación de la energía almacenada por las baldosas piezoeléctricas.**

En esta sección se realizarán tres diferentes ensayos de estimulación a la baldosa piezoeléctrica para poder tener un panorama más amplio de cuál es la

forma en que obtiene mejores resultados de tiempo de carga y descarga de la energía obtenida por las baldosas.

Los ensayos consisten en variar la fuerza a la que es sometida la baldosa para llenar los capacitores y tomar registro del tiempo que se tarda para hacerlo para después tomar registro del tiempo en que las tiras leds consumen esta energía para tener un panorama del tiempo que la energía almacenada en los capacitores podrá abastecer la carga de las tiras leds.

Los ensayos a realizar se describirán a continuación:

### **3.4.1 Ensayo 1: Factor deformante único 83 Kg a una sola pierna.**

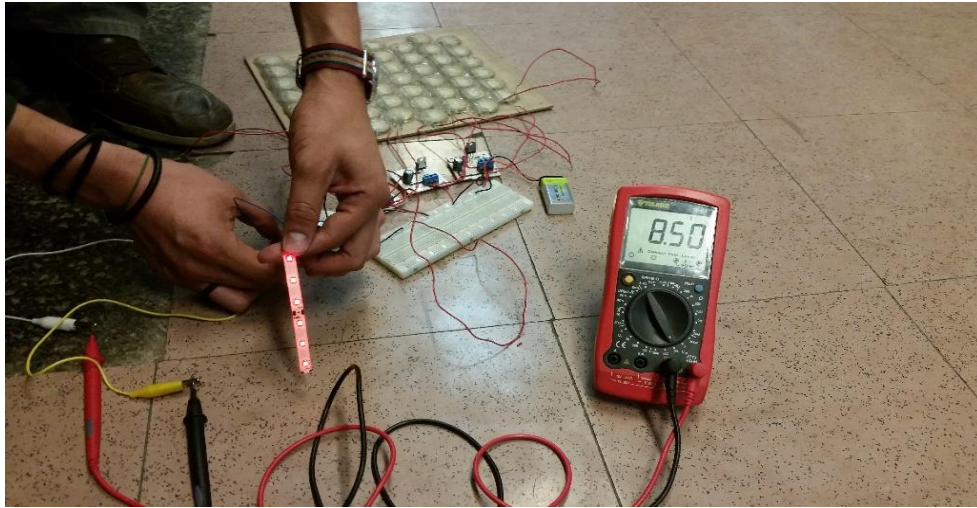
La fuerza que deformara a los discos piezoeléctricos que integran a la baldosa es el de una persona de 83 Kg de peso, concentrando su peso en una sola pierna.

En la figura 3.7 se muestra a la persona sometiendo su fuerza a la baldosa con una sola pierna, se observa que la pisada cubre una mínima parte de la baldosa piezoeléctrica lo que deja varios discos sin ser utilizados.



**Figura 3.7 Prueba 1: Factor deformante único 83 kg a una sola pierna.**

En la figura 3.8 se observa el proceso de descarga. La tira LED encendida y la caída de tensión en el multímetro.



**Figura 3.8 Descarga en el ensayo 1: Factor deformante único 83 kg a una sola pierna.**

Los resultados obtenidos para la carga del capacitor a una tensión de 8.79 volts se muestran en la tabla 4.2, así como los resultados obtenidos al final de la descarga del capacitor por la tira de 6 leds.

**Tabla 3.2 Resultados del Ensayo 1: Factor deformante único 83 kg a una sola pierna.**

Carga		Descarga	
Tensión [V]	Tiempo [s]	Tensión [V]	Tiempo [s]
8.79	155.88	1.7	20.11

### **3.4.2 Ensayo 2: Factor deformante 70 Kg a dos piernas.**

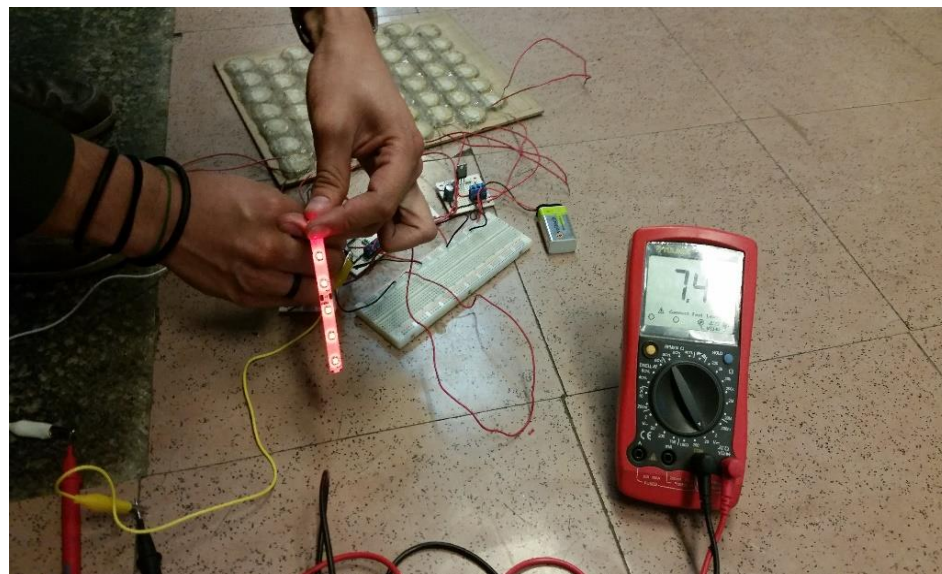
En éste segundo ensayo la fuerza a la que será sometida la baldosa piezoeléctrica es la de una persona de peso de 70 Kg, pero esta vez la fuerza la aplicara empleando ambas piernas como se muestra en la figura 3.9. Se observa que el área que cubre la pisada por ambas piernas es mayor a la de la prueba 1, quedando menos discos sin ser deformados.



**Figura 3.9 Ensayo 2: Factor deformante 70 Kg a dos piernas.**

El proceso de descarga se realizó de la misma manera que en el ensayo 1, tomando el tiempo en el que una tira de leds consume la energía del capacitor.

En la figura 3.10 se ilustra este proceso de descarga.



**Figura 3.10 Descarga en el Ensayo 2: Factor deformante 70 Kg a dos piernas.**

La tabla 3.3 refleja los datos obtenidos en el ensayo número 2.

**Tabla 3.3 Resultados del Ensayo 2: Factor deformante 70 Kg a dos piernas.**

Carga		Descarga	
Tensión [V]	Tiempo [s]	Tensión [V]	Tiempo [s]
8.74	36.95	1.55	38.96

### 3.4.3 Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna por factor.

El tercer ensayo consiste en utilizar una pierna de las dos personas involucradas en los ensayos 1 y 2 (83 Kg y 70 Kg) para compartir la fuerza con la que será deformado cada disco piezoeléctrico que integran a la baldosa.

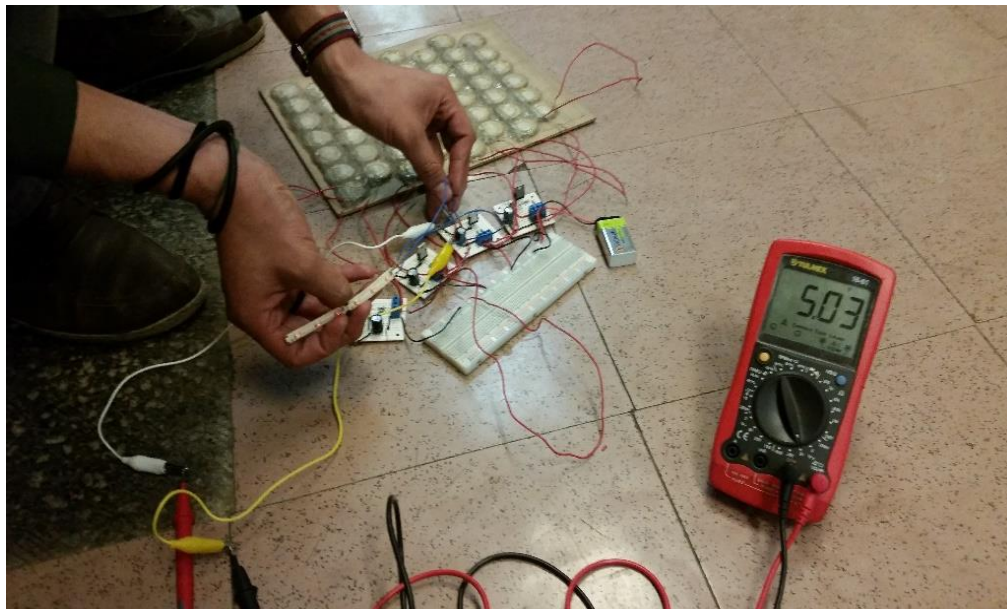
En la figura 3.11 se muestra la pierna de dos personas diferentes para deformar a los piezoeléctricos para poder cargar al capacitor.



Figura 3.11 Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna por factor.

La tira led encendida se muestra en la figura 3.12 durante el proceso de descarga del capacitor, mismo proceso que se llevó acabo en las pruebas 1 y 2.





**Figura 3.12 Descarga en el Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna por factor.**

Los resultados obtenidos en el ensayo 3 se muestran en la tabla 3. 4.

**Tabla 3.4 Resultados del Ensayo 3: Factor deformante Mixto 70 y 83 kg a una pierna por factor.**

Carga		Descarga	
Tensión [V]	Tiempo [s]	Tensión [V]	Tiempo [s]
8.81	59.86	1.32	33.69

### 3.5 Análisis de resultados

Recapitulando; los ensayos consistieron en mostrar la carga o el almacenamiento de energía en un capacitor con: a) un solo factor deformante, b) dos factores deformantes iguales y c) dos factores deformantes diferentes.

El análisis de resultados que aquí se presenta, se deriva a partir de la serie de 3 ensayos que se realizaron para mostrar el principio de obtención de energía eléctrica y su uso; a partir de la piezoeléctricidad.

Los factores deformantes son dos pesos humanos de aproximadamente 83 y 70 Kg.



### **A. Ensayo 1: Factor Deformante Único. 83Kg a una Sola Pierna.**

El ensayo 1; véase sección 3.4.1 consistió en llevar a carga un bloque de 4 capacitores; cada uno alimentado por 2 rieles de piezoeléctricos, que fueron deformados por un peso de 83Kg en repetidas ocasiones, hasta obtener un valor de carga medido de 8.79 volts. El tiempo de carga fue de, 155.88 segundos. A un ritmo de 1 paso por segundo.

### **B. Ensayo 2: Factor Deformante. 70Kg a dos Piernas.**

El ensayo 2; véase sección 3.4.2 consistió en llevar a carga un bloque de 4 capacitores; cada uno alimentado por 2 rieles de piezoeléctricos, que fueron deformados por un peso de 70Kg en repetidas ocasiones, hasta obtener un valor de carga medido de 8.74 volts. El tiempo de carga fue de 36.95 segundos. A un ritmo de 3 pasos por segundo.

### **C. Ensayo 3: Factor Deformante Mixto. 70 y 83Kg a una Pierna por Factor**

El ensayo 3; véase sección 3.4.3 consistió en llevar a carga un bloque de 4 capacitores; cada uno alimentado por 2 rieles de piezoeléctricos, que fueron deformados por un peso de 83Kg y 70 Kg en repetidas ocasiones, hasta obtener un valor de carga medido de 8.78 volts. El tiempo de carga fue de 59.86 segundos. A un ritmo de 1 paso por segundo.

### **3.5.1 Análisis Comparativo. Carga del Bloque de Capacitores.**

Como se puede observar, los tiempos de carga, en el bloque de 4 capacitores, varían dramáticamente en cada uno de los ensayos realizados; no con esto se pretende dar a entender que existe un error en el circuito de almacenamiento; mucho menos en la baldosa generadora. La variación en los tiempos de carga, de manera física, depende de la magnitud de la fuerza aplicada y de la constancia, es decir de la frecuencia, en la aplicación de esa fuerza.

Sí bien, una fuerza de gran magnitud pueda ocasionar un nivel de deformación mayor, y por ende, un mayor nivel de generación; no quiere decir que una fuerza de menor magnitud no pueda igualar, incluso superar los niveles de generación aportados por la fuerza mayor.

Cuando observamos la frecuencia en la aplicación de la fuerza, podemos notar que la fuerza de menor magnitud es aplicada con una mayor frecuencia que la



que se aplica con la de mayor magnitud; incluso posee una mayor frecuencia de aplicación que en la suma de ambas fuerzas. Es esta frecuencia de aplicación en la fuerza, uno de los factores detonantes del tiempo de carga del capacitor.

Ahora bien, no solo depende de la frecuencia de aplicación, el tiempo de carga del capacitor también involucra el aprovechamiento total de los elementos piezoeléctricos. En el primer ensayo, aunque la fuerza aplicada es mayor y su frecuencia de aplicación es baja; recordemos que sólo es aplicada por una sola pierna, es decir, el trabajo de accionar a todos los elementos de toda la baldosa, lo lleva solamente una extremidad.

El ensayo 2, que presenta una mayor frecuencia de aplicación pero una menor fuerza aplicada; se desarrolla con dos extremidades, es decir, el trabajo de cargar el bloque de 4 capacitores es repartido entre 2 extremidades; analizando esto, la diferencia de 13 Kg es compensada y superada por la elevada frecuencia y el número de objetos aplicados.

En el ensayo 3, la labor de carga del capacitor es repartido entre las 2 fuerzas de diferentes magnitudes, a una frecuencia similar a la presentada por la prueba 1. Aquí la baja frecuencia y la diferencia de pesos, son quienes juegan un papel importante ya que al ser dos fuerzas diferentes, de alguna manera, sumadas, dan como resultado un menor tiempo de carga en comparación a la primera prueba pero recordemos el aumento de un objeto o agente deformante al trabajo y una diferencia de 13 Kg.

### **3.5.2 Análisis Comparativo. Descarga por capacitor.**

El análisis comparativo de la descarga del capacitor, propiciada por el uso de la energía acumulada en él, difiere completamente al proceso de carga. El proceso de carga de los capacitores se realizó de manera simultánea; sin embargo, el proceso de descarga del bloque de capacitores se realizó de manera secuencial.

La razón por la cual el proceso de descarga se realizó de esa manera, deriva de que cada uno de los capacitores es alimentado por 2 rieles diferentes, pertenecientes a una misma baldosa, sin embargo, los capacitores son individuales, ajenos a un mismo circuito, de ésta manera cada uno de ellos debe tener un proceso de descarga ajeno al resto del bloque.

Los tiempos de descarga de cada uno de los capacitores, en cada prueba, se desglosan en la siguiente tabla 3.5

**Tabla 3.5 Periodos de descarga de los capacitores.**

	Tiempo de Descarga (s)			
	C1	C2	C3	C4
Prueba 1	20.11	19.97	19.98	18.65
Prueba 2	38.96	38.92	37.96	36.52
Prueba 3	33.69	33.73	31.67	28.12

Observemos que en la tabla 3.5 los periodos de descarga de los capacitores varían dependiendo del nivel de carga que éstos adquirieron.

### **3.6 Aplicación de la energía en un sistema de iluminación.**

La fase final del desarrollo del sistema de generación a base de elementos piezoeléctricos, intenta mostrar la operación del mismo aplicándose a un sistema más completo, es decir, a una carga de dimensiones mayores a la presentada en los ensayos anteriores.

Recapitulando los ensayos anteriores, observamos que éstas se desarrollan empleando el generador piezoeléctrico como fuente de excitación y proveedor de carga, que posteriormente se ve almacenada en un elemento capacitivo. Como se vio en la descripción de esos ensayos, la carga que logra ser almacenada es consumida extremadamente rápido, tanto que resulta imposible sostener una carga de dimensiones mayores a la tira LED presentada en los ensayos; es entonces esta limitante, el factor detonante para el desarrollo y modificación de la propuesta.

La modificación en el sistema original, mostrado en los ensayos anteriores, consta de la simple sustitución del capacitor por una batería y de la instalación del nuevo sistema de iluminación. La modificación resulta mínima, pero es ésta la que permite incrementar de manera drástica el periodo de descarga, visto de otra manera, el uso de la batería permitirá incrementar el tiempo en que puede ser sostenido el sistema de iluminación; mientras que la nueva instalación nos permitirá someter a un ensayo de exigencia al generador. La instalación del sistema de iluminación se realizó en el edificio 2, cubículo C2102 de la unidad profesional Adolfo López Mateos, ESIME, unidad Zacatenco.

Las figuras 3.13 y 3.14 exhiben la instalación del nuevo sistema de iluminación y de la sustitución del capacitor.



**Figura 3.13 Instalación del sistema de iluminación.**



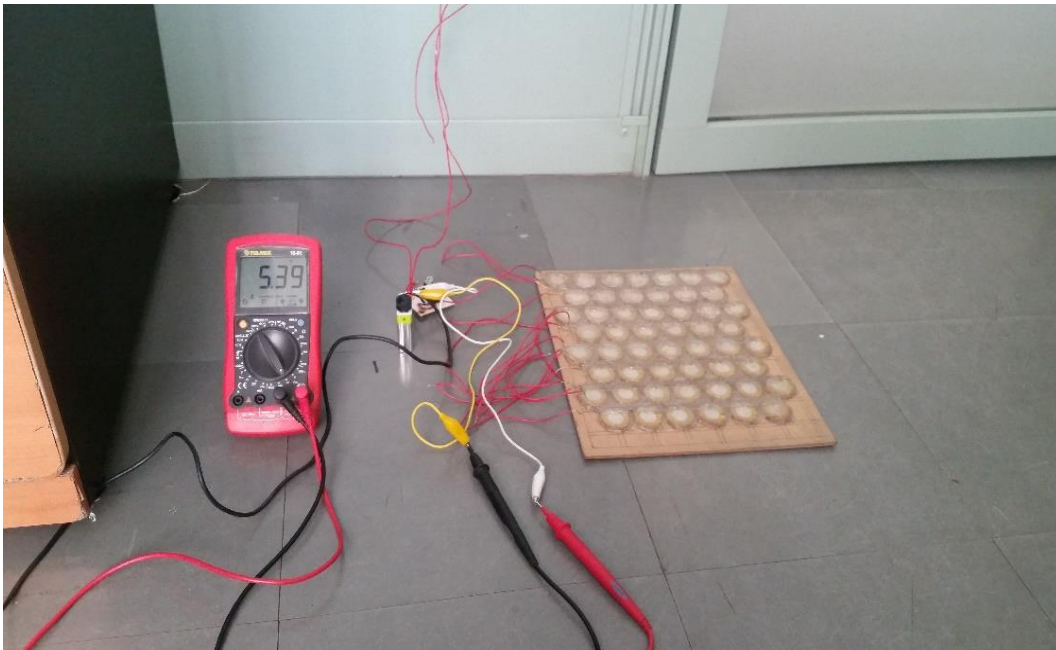
**Figura 3.14 Instalación de la baldosa piezoeléctrica.**

La modificación presentada, el cambio de capacitor a batería, al igual que todas las anteriores, es evaluada para presentar, a raíz de los resultados, las conclusiones pertinentes.

La evaluación final del generador, a grandes rasgos, consiste entonces en una serie de pruebas que comprenden la modificación del circuito electrónico, la sustitución o reemplazo de uno de sus componentes y la exigencia de una carga mayor. Los ensayos que comprenden la evaluación final se enlistan y describen a continuación.

### a) Sistema con carga baja.

Lograr el encendido total de la tira, requiere que su alimentador, en este caso la batería, ostente un nivel de carga que sobrepase el mínimo requerido para la operación (7.5 volt); y debido a que la batería adquiere la carga a partir del generador piezoeléctrico, éste habrá de ser deformado para comenzar a generar la diferencia de potencial necesaria. Se parte de un valor inicial medido en terminales de la batería de aproximadamente 5 volts. Para el desarrollo del ensayo, se llevó a la batería a un nivel mínimo de carga, 3.06 volt; éste valor, por características propias de la batería, en su condición de recargable, se considera una tensión remanente, es decir, un valor propio del dispositivo casi imposible de liquidar. Del valor de 3.06 volt se comienza el proceso de carga hasta llegar al valor de 5.39 volt; donde podemos asegurar que es un valor de tensión medio, pero que resulta insuficiente para lograr el encendido de la tira LED. La figura 4.15 muestra la carga de la batería.



**Figura 3.15 Baja carga en la batería.**

La figura 3.16 muestra el comportamiento de los leds ante una baja carga en la batería, se observa que la tensión es insuficiente para activar la tira conectada. La tensión acumulada es insuficiente para que los LED cambien de estado inactivo a activo.



**Figura 3.16 Leds en baja carga de la batería.**

**b) Sistema con carga media.**

La carga de la batería, conforme es deformado el generador, incrementa. De la medición inicial de 3.06 volt, pasando por el valor de 5,39 volt, se observa que la tensión continua siendo insuficiente. El valor de carga media, medido, es de 7.1 volt, tensión suficiente para alimentar una tira LED de apenas 8 elementos, sin embargo resulta ser insuficiente para levantar la carga que representa una tira de 300 LEDS; 12 W a 12 V.

Dentro de los rangos de media carga, se logra el incremento hasta un valor de 7.65 volt; éste valor sobrepasa los límites de tensión mínimos requeridos, con lo cual, al accionar el sistema; se puede apreciar que la tira responde emitiendo una tenue luminosidad. A partir de éste valor, podemos asegurar un funcionamiento del sistema. Como se muestra en la imagen 3.17 la batería tiene una carga de 7.65 volt lo que indica una carga media en la batería.





**Figura 3.17 Carga media en la batería.**

La figura 3.18 muestra los leds con una baja intensidad.

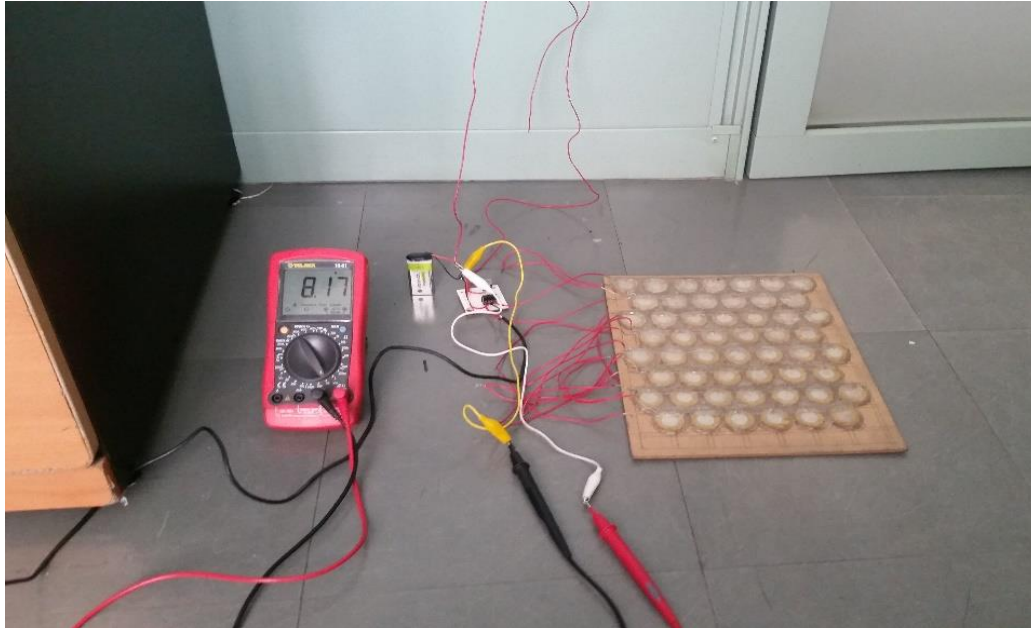


**Figura 3.18 Leds en carga media de la batería.**

**c) Sistema con carga alta.**

Tras un periodo de carga de aproximadamente 0.1 volt cada 7 segundos, la batería adquiere una tensión en terminales de 8.1 volt; ésta tensión obtenida

está por encima de los requerimientos mínimos, sin embargo, al accionar el sistema, podemos observar el aumento en la intensidad luminosa, no obstante, continua siendo insuficiente. En la figura 3.19 se muestra la batería con una carga de 8.17 volt.



**Figura 3.19 Carga alta en la batería.**

La figura 3.20 muestra los leds con un aumento en la intensidad luminosa pero continua siendo insuficiente.



**Figura 3.20 Leds en carga alta de la batería.**

#### d) Sistema con carga máxima.

Finalmente, tras un tiempo estimado de 2 horas y 42 minutos, la deformación constante aplicada al generador, ha permitido llevar a la batería a su nivel máximo de carga, 8.7 volt. Este nivel de tensión, dirigido a la alimentación de la tira LED, permite observar la operación máxima de la misma. Aunque se habla de una diferencia de 3 volt; la batería es capaz de mantener encendido, por un tiempo de 53 minutos, al sistema de iluminación sin interrupciones.

Resaltemos el periodo de descarga; el empleo del capacitor permitía un periodo de carga más rápido, pero así como cargaba era consumido. Los tiempos de carga y descarga eran relativamente cortos. Se necesitó de 2 minutos para adquirir la carga total, sin embargo el periodo de descarga no excedía los 30 segundos. La sustitución del capacitor por la batería, aunque incrementó el esfuerzo y el tiempo para carga, también aumentó considerablemente el tiempo de descarga; un aumento en los tiempos de descarga se traduce en un mayor tiempo de operación del sistema de iluminación.

Los periodos de carga, a partir de un valor mínimo de carga (3.6volt) son del orden de 7 segundos por 0.1volt almacenado y conforme se adquiere carga (7.7volt), el periodo aumenta, se vuelve de casi 1 minuto 14 segundos.

Las figuras 3.21 y 3.22 exhiben la carga máxima de la batería y su utilización.

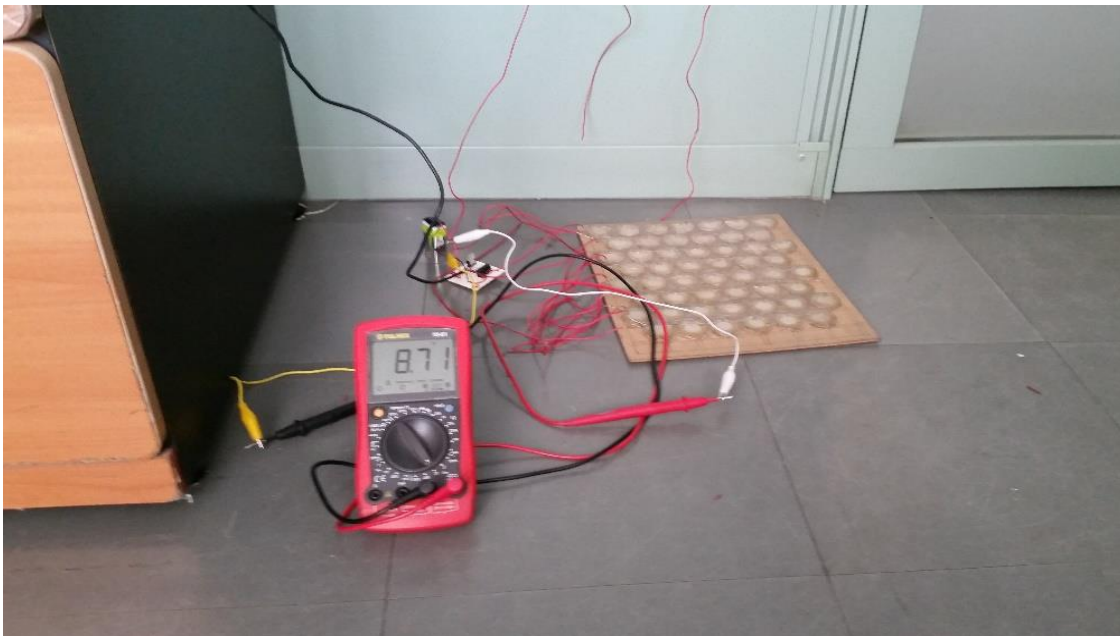


Figura 3.21 Carga alta en la batería.



Figura 3.22 Leds en carga máxima de la batería.

### 3.7 Análisis de costo-beneficio

En éste apartado, veremos si el costo de la construcción e implementación de las baldosas puede ser recuperado en un periodo de tiempo menor a la vida útil de cada baldosa, es decir, veremos qué tan rentable resulta tener instalado un sistema de generación eléctrico a partir de baldosas piezoeléctricas para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia.

Los costos referentes a la construcción de las baldosas se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 4.6 Lista de costos en la construcción de 3 baldosas

COSTO TOTAL 3 BALDOSAS			
CONCEPTO	CANTIDAD	C.UNITARIO MXN	C.TOTAL MXN
P.FIBRACEL	3	7	21
CARTÓN	2	3	6
ADHESIVO	2	20	40
PIEZOS	164	2	328
CABLE	30	4	120
ESTAÑO	1	250	250
SILICONA	50	1,5	75
			840 MXN



Los costos referentes a la construcción de los circuitos electrónicos se muestran en la tabla 3.7:

**Tabla 3.7 Lista de costos en la construcción de 12 circuitos electrónicos.**

COSTO TOTAL 12 CIRCUITOS ELECTRÓNICOS			
CONCEPTO	CANTIDAD	C.UNITARIO MXN	C.TOTAL MXN
P.FENÓLICA	12	8	96
TRANSISTOR	12	7	84
CAPACITOR	12	4	48
BORNERA	12	2,5	30
RESISTOR	12	5	15
BATERÍA	1	140	140
RESISTOR	12	5	15
ALAMBRE	5	4	20
			448 MXN

Y los costos referentes a la instalación del equipo de generación son expresados en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8 Lista de costos para la instalación propuesta.**

COSTO TOTAL IMPLEMENTACIÓN			
CONCEPTO	CANTIDAD	C.UNITARIO MXN	C.TOTAL MXN
TIRA LED	1	199	199
CABLE	30	4	120
INT. 3 POLOS	1	18	18
			337 MXN

Realizando el cálculo; la instalación final de todo sería de un aproximado de 1,9625 MXN. A éste valor, hace falta incrementar la mano de obra; tomando un valor referente al pago de hora por ingeniería mexicana de aproximadamente 20USD, es decir 360 pesos la hora; y un periodo de labor de 5hrs en construcción y 2 por concepto de instalación. Tenemos un total final de 4,145 MXN.

Ahora bien, habrá que conocer el consumo de un sistema de iluminación LED y el periodo de vida de la baldosa; para con esto, poder determinar la rentabilidad de la instalación. La tira LED, que funge como el pilar del sistema de iluminación, tiene un consumo de aproximadamente 12 W, mientras que la baldosa, específicamente los elementos piezoeléctricos tienen un periodo útil de vida de 20 años.



El kilowatt hora, Tarifa 1, para consumo residencial tiene un costo promedio de \$0.809 para los primeros 75 Kw/h; si la tira LED tiene un consumo de 12Watts, en una hora habrá consumido 12W/h; y si consideramos que tiene un periodo de operación de 5hrs al día, esto nos dará un consumo por día de 60W/h, en una semana tendremos un consumo de 300W/h y multiplicado por las 52 semanas del año tendremos un consumo de 15,600W/h; visto de otra manera, tendremos un consumo de 15.6KW/h. Si aproximamos el costo, tendremos una deuda promedio de 12.6204 MXN al año por concepto de iluminación.

Considerando el mismo costo en el precio de la energía, el actual inmueble cuenta con 4 luminarias de 32W, realizando el análisis anterior aplicado a éstas condiciones tenemos que cada luminaria consume por esas 5 horas un total de 160wh; por semana serán entonces 800wh; por lo que por año tendremos un consumo de 41,600W/h o lo mismo a 41.6Kw/h, que nos dará un adeudo promedio de 33.6544 MXN.

Si cada elemento piezoeléctrico tiene la capacidad para producir un promedio de 15 volts y la resistencia que presenta el LED es inferior a la unidad (1ohm) multiplicada por la cantidad de los mismos; podemos hacer el cálculo de la potencia:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{15^2}{300} = 0.75watt \quad (3.6)$$

Donde:

P= potencia generada

V= tensión eléctrica

R= resistencia

Si tomamos esa potencia generada por cada elemento piezoeléctrico y la multiplicamos por el número de elementos conectados, tenemos que por baldosa, en caso de accionar todos los elementos, podríamos obtener 39 watt; lo suficiente para mantener la demanda de la tira LED. Multiplicando esa potencia por el número de generadores disponibles; tenemos que se podrían producir 117 watts cuando todos los elementos de las 3 baldosas se accionen.

Considerando ese hipotético valor de potencia, tenemos que el costo por esa cantidad sería de aproximadamente: 0.117Kw, en caso de ser consumida; sería



de 0.117Kw/h, multiplicando ese valor por el costo por kilowatt tenemos un precio final de 0.0946 MXN. Éste precio y potencia son o existen cuando se deforman las 3 baldosas instaladas, es decir, si en una pisada, se lograra deformar las 3 baldosas, éste sería el valor de potencia generada y el costo de la misma.

Si se le aplicaran a estas baldosas un total de 50 pisadas por hora, tendríamos una potencia generada de 5850 watt, 5.85kw por hora. Si multiplicamos por las 5 horas de uso, tenemos un total de 29250w, 29.25 Kw por día; esto nos aporta una potencia de 146,250w, 146.25Kw por semana y un total de 7,605Kw por año; si llevamos el costo equivalente, tendríamos un valor de 6152.445 MXN.

En resumen, el costo por año, en el tiempo establecido, del sistema de iluminación actual (considerando una variación mínima en el precio del Kwh) es de 33.65 MXN. En 20 años tendrá un costo aproximado de 673MXN. Ahora bien sumemos el costo de las 4 luminarias; 69MXN por luminaria, considerando 4, tenemos un total final de 952 MXN por costo de energía en 20 años más los luminarios.

Por el contrario, instalar las baldosas y un nuevo sistema de iluminación a base de tira LED tendría un costo de 4,145MXN. Para esos mismos 20 años.

Comparando éstos costos, no resulta rentable hacer uso de éstos sistemas. Ya que el costo de inversión, dejando de lado los costos de mantenimiento en ambos sistemas, se vería recuperado hasta dentro de 87.1 años.

Si en 20 años, con todos los gastos incluidos, tenemos un precio final de 952 MXN, por año sería un equivalente a 47.6MXN; lo que nos arroja un tiempo de recuperación de 87.1 años

$$Gasto = (47.6MXN)(87.1AÑOS) = 4145.96MXN \quad (3.7)$$

Sólo hasta entonces se vería recuperado el costo de la inversión en baldosas piezoeléctricas.

“Este precio y tiempo de recuperación no considera luminarias, dejando de lado la mano de obra de la instalación actual y material. los precios de la instalación actual se muestran en la tabla 3.9.



**Tabla 3.9 Lista de costos en la instalación actual.**

SISTEMA DE ILUMINACIÓN ACTUAL			
CONCEPTO	CANTIDAD	C. UNITARIO MXN	C.TOTAL MXN
LUMINARIAS	4	69	276
CABLE	30	6,19	185,7
INTERRUPT	1	15	15
			476,7

Si consideramos el mismo tiempo de horas hombre o mano de obra de instalación (2 horas) tenemos un total de 720 MXN; por lo que el final total será de 1,196.7MXN por material y mano de obra; si a esto le sumamos el valor monetario del pago por concepto de energía en 20 años, tenemos un total de 1,896.7 MXN. Por lo que ahora nuestro periodo de recuperación será de 43.71 años.

De una u otra manera, considerando los mismos parámetros para cada sistema, tenemos que la aplicación de baldosas piezoeléctricas resulta elevada en costo, pero se recomienda para poder abastecer sistemas de iluminación pequeños como lo sería un cuarto de casa, pequeñas oficinas.





## Capítulo 4.

# Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

Pensar en un modo de generación de energía eléctrica que a base de simples pisadas pueda sostener y alimentar un sistema de iluminación, tal cual nos lo presenta el metro de Tokio, el estadio Santiago Bernabéu, o algunos más, resulta impresionante; y resulta todavía más impresionante observar su método: pisar, almacenar y utilizar; pisar los elementos piezoeléctricos, almacenar toda esa carga en baterías y finalmente utilizarla. En éste proyecto se realizó exactamente lo mismo, pero resultó que no es tan sencillo como parece.

El proyecto, efectivamente funciona, y resulta importante resaltar que el proceso de ensamblado, instalación y almacenamiento de energía resulto complicado.

Los elementos piezoeléctricos con que se trabaja, son elementos que tiene una función indicadora, son utilizados en los llamados “buzzers”, por lo cual, no están especialmente diseñados para ser generadores primarios. Trabajar con éste tipo de elementos causó serios problemas ya que aunque son elementos que son capaces de sostener una tensión pico, los parámetros potencia y corriente son extremadamente bajos, tanto, que resulta casi imposible registrarlos en medición; hay, en ocasiones, que trabajar los valores bajo cálculo. Si trabajamos con parámetros tensión, todo tiene que girar en torno a la tensión, utilizar la mayor ventaja de éstos dispositivos.

Lograr construir un “equipo” que involucre el trabajo en conjunto de los elementos piezoeléctricos, tampoco resultó la tarea más sencilla. Estos elementos son un tanto delicados, por lo tanto hay que tratarlos así. El proceso de soldadura, que se aplicó a los elementos, puede ser el más desgastante, ya que la parte cerámica del disco es extremadamente delgada y un sobrecalentamiento puede erosionarla dejando inservible al elemento. El proceso debe ser rápido y preciso.

Debido a la delicadeza propia de los elementos piezoeléctricos, éstos deben ser protegidos; porque como recordaremos, estarán dispuestos a constantes impactos mecánicos. La protección se intentó de diferentes maneras, fallando todas. Finalmente se consiguió recubriendo toda el área de silicona. Habría ahora que analizar si este recubrimiento reduce o frena la deformación que cada disco debe recibir para generar.

El proceso más complicado de todos, sin duda fue el intentar almacenar la energía producida. Para esta etapa se desarrollaron varias versiones de varios circuitos electrónicos que fracasaban en el intento. No fue hasta un asesoramiento profesional, cuando logramos desarrollar un circuito que nos



permitiera canalizar la mayoría de la carga hacia el almacenamiento. Posteriormente, debido a los problemas que presentaba el proceso de utilización de esa energía, se tuvo que perfeccionar; para prolongar ese tiempo de utilización.

Inicialmente, se planteó almacenar toda la energía producida en capacitores; los primeros circuitos, hasta el penúltimo de ellos, emplearon capacitores. En ellos se puede apreciar claramente el proceso de carga; incluso se puede alegar que es un proceso relativamente rápido, el problema surge al momento de intentar utilizar esa energía. Como recordaremos, el tiempo o periodo de descarga de un capacitor es muy rápido; en ensayos físicos, pudimos observar periodos de descarga del orden de los 5 segundos. ¿Cómo lograr aumentar ese tiempo?, de manera breve mencionamos que si a ese capacitor se le agrega una resistencia de salida; el periodo de descarga se volverá más prolongado, pero considerando nuestros parámetros eléctricos, el colocarle una resistencia no prolongaría los tiempos. Finalmente, se optó por utilizar una batería recargable; en los circuitos electrónicos se reemplazó al capacitor por una batería recargable de 9 volts.

En los ensayos físicos, resulta que la batería tiene un periodo de carga mucho más elevado que el capacitor; por lo cual, cargarla hasta el punto de poder emplearla como alimentador a las tiras LED, requiere de mucho más tiempo. Sin embargo, el proceso de descarga es también mucho más elevado por lo cual el sistema de iluminación puede sostenerse por más tiempo siendo esta una gran ventaja de utilizar pilas de volts recargables.

Los sistemas de generación piezoeléctricos son limpios y confiables, tienen un periodo de vida elevado y no requieren de alguna excitación dirigida como los grandes generadores para activarse. Con la simple acción de caminar se logra generar. Utilizar un sistema de generación piezoeléctrico puede ayudar a reducir el costo por los servicios de energía.

## **5.2 Recomendaciones**

Las siguientes recomendaciones se hacen para una posible continuación de éste trabajo y aspirar a la obtención de mejores resultados.

Es necesario dar seguimiento y continuidad al estudio de los materiales piezoeléctricos como una fuente de generación de energía eléctrica para que esta pueda tener un mayor alcance y campo de aplicación, ya que en México no existe la información y la divulgación necesaria. La energía obtenida por el efecto piezoeléctrico puede llegar a ser una fuente alternativa importante en un futuro no muy lejano, debido al crecimiento en la demanda de energía eléctrica y al abuso que se tiene a los recursos naturales.



---

Se recomienda intentar utilizar algún otro material piezoeléctrico que pueda tener mejores características en cuanto a parámetros de corriente y potencia, ya que como se mencionó, del material empleado, su función principal no es la de generación, si no de señalización.

Otra posibilidad para mejorar la carencia de los parámetros antes mencionados es adentrarse más en temas de electrónica de potencia que puedan contribuir a un mejor resultado y poder abastecer a cargas de mayor potencia.

Parte de buscar algún otro material piezoeléctrico no solo es para mejorar los parámetros bajos de corriente y potencia, se recomienda buscar algún otro material que pueda soportar una carga de peso mucho mayor sin llegar al punto de ruptura y así poder utilizar diferentes formas de deformación como lo son: el tránsito vehicular, de maquinaria pesada, transportes férreos y no solo el flujo peatonal como se realizó en este trabajo.

Retomando el estudio de costo beneficio donde se menciona que el costo de elaboración e instalación es elevado se sugiere tomarse el tiempo para buscar otra alternativa en los materiales para la elaboración y tratar de que los costos se reduzcan y hagan más llamativo la inversión en este sistema



## Referencias

- [1] Michel Venet Zambrano, *Historia de los materiales piezoeléctricos. Efecto piroeléctrico, electrostrictivo y electro-óptico. Proceso de fabricación de cerámicas piezoeléctricas*, São Carlos, 2004.
- [2] B. Jimenez, *Materiales piezoeléctricos.*, Madrid, Madrid, 2006.
- [3] Recolección de energías ambientales mediante materiales ceramicos y monocristalinos, 2010.
- [4] Vicioli, «Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico,» Mendoza, 2009.
- [5] Pauchet, *Inteligencia en materiales innovadores.*, Massachusetts, 2008.
- [6] solemexico, «solemexico,» [En línea]. Available: <http://www.solecmexico.com/>. [Último acceso: Mayo 2015].
- [7] M. Pascual, *Cristaloquímica "Estructuras Cristalinas. Modelos estructurales básicos"*.
- [8] A. Pereira, *Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades.*, São Carlos - Brasil, 2010.
- [9] D. meganeboy, «Aficionados a la Mecanica,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/sensores4.htm>. [Último acceso: 18 Junio 2015].
- [10] Materials, «Soluciones Avanzadas para la Industria Aeroespacial,» 2014.
- [11] «EcuRed,» 14 Diciembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.ecured.cu/index.php/Piezolectricidad>. [Último acceso: 19 Junio 2015].
- [12] C. Rodriguez y J. Elizondo Garza, «Actuadores piezoelectricos,» Ingenierias, 2000.
- [13] Muñoz Salas, *Diseño de un sistema de verificación del estado de los sónares utilizados en la actividad pesquera*, 2011.
- [14] «Ciencias místicas,» [En línea]. Available: <http://www.cienciasmisticas.com.ar/tecnologia/comunicaciones/sonar/index.php>. [Último acceso: 18 Junio 2015].
- [15] M. Poblet, *Introducción a la bioingeniería*, Marcombo, 1988.
- [16] H. Sanchez, *Caracterización de un cerámico Circonato Titanato de Plomo sintetizado por el proceso spark plasma sintering*, Doctoral dissertation, 2012.



- [17] R. Marin, *Sistemas de seguridad y confortabilidad*, Paraninfo, 2012.
- [18] «Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía,» Universidad de la República. Núcleo de Ingeniería Biomédica. Facultades de Medicina e Ingeniería.
- [19] S. Kalpakjian, «Manufactura, ingeniería y tecnología,» Pearson educación, 2002.
- [20] *Residential piezoelectric Energy Sources*, Delta, 2004.
- [21] «Libertad digital,» 7 Octubre 2009. [En línea]. Available: <http://www.libertaddigital.com/ciencia/una-empresa-israeli-logra-generar-electricidad-gracias-al-trafico-1276372565/>. [Último acceso: 18 Junio 2015].
- [22] A. Paz, «Electricidad Auto-generada- El tranque en las grandes ciudades podrá ahora generar electricidad,» 25 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.clase911.com/CV/index.php/45-technologie/technologie/122-electricidadautogenerada-el-tranque-en-las-grandes-ciudades-podran-ahora-generar-electricidad>. [Último acceso: 28 Junio 2015].
- [23] «En el metro de Tokyo los viajeros generan electricidad con sus pisadas,» 28 Diciembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.tuexperto.com/2008/12/28/en-el-metro-de-tokyo-los-viajeros-generanelectricidad-con-sus-pisadas/>. [Último acceso: 22 Junio 2015].
- [24] «Unas baldosas generan energía con nuestras pisadas,» National Geographic, 2010. [En línea]. Available: <http://www.nationalgeographic.es/noticias/medio-ambiente/energia/baldosas-energiapisadas>. [Último acceso: 24 Junio 2015].
- [25] P. Systems, «Pavengen,» [En línea]. Available: <http://www.pavegen.com/>. [Último acceso: 28 Junio 2015].
- [26] G. Melero, «Principio de la piezoelectricidad,» *Innovación y experiencia educativas*, nº 28, 2010.
- [27] Aarón Almazán Verdejo, Tesis: “Factibilidad de la energía eléctrica mediante piezoelectricidad”, México D.F., 2013.
- [28] Rodríguez Gutiérrez Roberto Carlos, Tesis: “Obtención de energía eléctrica, a través de piezoelectricidad”, México D.F., 2013.
- [29] T. Staner., *HUMAN-POWERED WEARABLE COMPUTING*, IBM SYSTEMS, 1996.
- [30] J. Gallego, *PIEZOELECTRIC CERAMICS AND ULTRASONIC TRANSDUCERS*, Scienst Instrum, 1989.



- 
- [31] «<http://www.piezoproducts.com/index.php?id=144&L=0>,» Johnson Matthey Piezoproducts, 2012. [En línea]. [Último acceso: Junio 2015].
- [32] A. Pereira, *CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS: FUNCIONAMIENTO Y PROPIEDADES*, Sao Brasil: ATCP Engenharia Fisica, 2010.
- [33] Zapata Valencia, «Análisis de viabilidad para desarrollo de prototipo de acera que produce electricidad,» Medellin, 2012.
- [34] «<http://www.lagaceta.com.ar/nota/230726/informacion-general/>,» <http://www.lagaceta.com.ar/nota/230726/informacion-general/>, Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.lagaceta.com.ar/nota/230726/informacion-general/>. [Último acceso: Junio 2015].
- [35] A. Serway. Thompson. Serway, *FISICA PARA CIENCIAS E INGENIERÍA*, 2004.
- [36] Madeplus, «Maderas Madeplus,» [En línea]. Available: <http://www.madeplus.mx/tableros.html#fribracl>. [Último acceso: 30 Agosto 2015].
- [37] Eskarton, «Propiedades del carton,» [En línea]. Available: <http://eskarton.com.mx7propiedades-del-carton-corrugado-parte-1/>. [Último acceso: 30 Agosto 2015].
- [38] Cianoacrilato, definicion y propiedades. Toxicidad y efectos secundarios. aplicaciones en medicina y odontologia., 2012.
- [39] R. SRL, «Propiedades de la silicona,» [En línea]. Available: <http://www.raholin.com>. [Último acceso: 2 Septiembre 2015].
- [40] R. Carlos C. Ávalos Franco, *Estudio de visitantes a museos*, México DF: CONACULTA, 2011.
- [41] A. Tapia, «Movimiento: Una valiosa fuente de energía,» *Cosntructor eléctrico*, 2014.