



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

**Ingeniería de detalle y análisis del desempeño de un sistema de plantillas  
piezoeléctricas para harvesting de energía a través del calzado**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Quizhpe Orellana, Manolo Michael.

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA - ECUADOR

2013

## **APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN**

Ingeniero.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN**

De mi consideración:

El presente trabajo, de fin de titulación: Ingeniería de detalle y análisis del desempeño de un sistema de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía a través del calzado, realizado por el profesional en formación: Manolo Michael Quizhpe Orellana, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, noviembre de 2013

f).....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Manolo Michael Quizhpe Orellana declaro ser autor del presente trabajo de fin de titulación: Ingeniería de detalle y análisis del desempeño de un sistema de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía a través del calzado, de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Jorge Luis Jaramillo Pacheco director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor: Manolo Michael Quizhpe Orellana

Cédula: 1104306046

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a mi madre, mujer grandiosa en mi vida, quien con sus palabras duras, sinceras y llenas de razón, propiciaron a la culminación del mismo. Ella, quien sufre por mí y conmigo, está en todos los tiempos, en todos mis logros académicos y culturales, en el mundo paralelo que solo alguien tan frágil y fuerte a la vez está, ve todo el complejo mundo, que casi cegado no se puede ver.

Manolo Quizhpe

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco enormemente a mis padres y familia, quienes me apoyaron en todo momento y circunstancia. Al Ing. Jorge Jaramillo, director del proyecto de fin de titulación, quien guio más que en la culminación del proyecto, como ejemplo de ser persona profesional. A los ingenieros de la carrera, compañeros y amigos.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABLAS .....	xi
RESUMEN EJECUTIVO .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS .....	4
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>5</b>
<b>GENERALIDADES DEL HARVESTING DE ENERGÍA A TRAVÉS DEL CALZADO.....</b>	<b>5</b>
1.1    Introducción.....	6
1.2    Generalidades del harvesting de energía a través del calzado.....	7
1.2.1    Breves nociones sobre la locomoción humana.....	7
1.2.2    Uso de plantillas piezoeléctricas.....	8
1.2.2.1    Plantilla de polifluoruro de vinilideno PVDF.....	10
1.2.2.2    Plantilla de zirconato titanato de plomo PZT.....	12
1.2.3    Algunas aplicaciones del harvesting de energía a través del calzado para provisión de energía.....	15
<b>CAPITULO 2 .....</b>	<b>16</b>
<b>PIEZOELECTRICIDAD Y HARVESTING DE ENERGÍA A TRAVÉS DEL CALZADO .....</b>	<b>16</b>
2.1    Introducción.....	17
2.2    Generalidades de la piezoelectricidad .....	17
2.2.1    Polarización piezoeléctrica.....	18
2.2.2    Constantes piezoeléctricas.....	18
2.2.2.1    Constante de carga piezoeléctrica $d$ .....	19
2.2.2.2    Constante de tensión piezoeléctrica $g$ .....	19
2.2.2.3    Coeficiente de acoplamiento $K$ .....	20

2.2.2.4	<i>Factor de calidad mecánico Q.</i> .....	20
2.2.2.5	<i>Factor de disipación tan <math>\delta</math>.</i> .....	20
2.2.2.6	<i>Temperatura de Curie TC.</i> .....	21
2.2.2.7	<i>Constante de frecuencia N.</i> .....	21
2.2.3	Tipos de materiales piezoeléctricos.....	21
2.2.4	Efecto piezoeléctrico. ....	22
2.2.5	Polaridad de carga. ....	24
2.2.6	Ecuaciones Piezoeléctricas.....	25
2.2.6.1	<i>Ecuaciones para el efecto piezoeléctrico directo.</i> .....	26
2.2.6.2	<i>Ecuaciones para el efecto piezoeléctrico indirecto.</i> .....	28
2.3	Generadores piezoeléctricos .....	30
2.3.1	Materiales piezoeléctricos como generadores.....	31
2.3.2	Conversión y conservación de energía en un piezogenerador PZT.....	37
2.3.2.1	<i>Mecánica</i> .....	37
2.3.2.2	<i>Conversión mecánica – eléctrica</i> .....	38
2.3.2.3	<i>Conversión eléctrica – eléctrica</i> .....	41
2.3.2.4	<i>Conservación eléctrica – almacenamiento de energía para carga.</i> .....	41
2.4	Prediseño de un sistema piezogenerador de harvesting de energía basado en transductores piezoeléctricos .....	43
<b>CAPITULO 3</b> .....		46
<b>INGENIERÍA DE DETALLE DE UN SISTEMA DE PLANTILLAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA EN EL CALZADO</b> .....		46
3.1	Introducción.....	47
3.2	Ingeniería de detalle de un sistema piezoeléctrico para harvesting de energía en el calzado .....	47
3.2.2	Ingeniería de detalle del bloque piezoeléctrico. ....	48
3.2.2.1	<i>Sobre el elemento piezoeléctrico a utilizar.</i> .....	48
3.2.2.2	<i>Sobre la plantilla piezoeléctrico a emplear.</i> .....	51
3.2.2.2.1	<i>Primer prototipo de plantilla piezoeléctrica.</i> .....	51
3.2.2.2.2	<i>Segundo prototipo de plantilla piezoeléctrica.</i> .....	53
3.2.2.2.3	<i>Tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica.</i> .....	55
3.2.3	Ingeniería de detalle del bloque de almacenamiento o storage. ....	57

3.2.4	Sistema piezoeléctrico completo para harvesting de energía, interfaz para el usuario. ....	60
<b>CAPITULO 4</b>	.....	<b>61</b>
	<b>ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE 3 PROTOTIPOS DE PLANTILLAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA EN EL CALZADO</b> .....	<b>61</b>
4.1	Introducción.....	62
4.2	Evaluación del desempeño de las plantillas piezoeléctricas propuestas.....	62
4.2.1	Aproximación matemática de la potencialidad de generación.....	62
4.2.2	Preparativos para pruebas de campo.....	69
4.2.3	Pruebas de campo. ....	70
4.2.3.1	<i>Resultados obtenidos en la primera prueba.</i> ....	71
4.2.3.2	<i>Resultados obtenidos en la segunda prueba.</i> .....	74
4.2.3.3	<i>Resultados obtenidos en la tercera prueba.</i> ....	78
	CONCLUSIONES.....	80
	RECOMENDACIONES.....	83
	TRABAJOS FUTUROS.....	84
	REFERENCIAS.....	85
	ANEXOS.....	89
	ANEXO 1. PAPER: “INGENIERÍA DE DETALLE Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE PLANTILLAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA A TRAVÉS DEL CALZADO”.....	90
	Ingeniería de detalle y análisis del desempeño de un sistema de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía a través del calzado.....	91



## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. 1. Intervalos de la fase de apoyo. CT: Contacto del talón, AP: Apoyo plantar, AM: Apoyo medio, ET: Elevación del talón, DP: Despegue del pie. Intervalos: Aceptación del peso, Apoyo medio y Despegue del pie. ....	7
Fig. 1. 2. Áreas de mayor presión en el pie: a) en reposo, b) al caminar. ....	9
Fig. 1. 3. Contracción y elongación del material piezoeléctrico alrededor de la plantilla. ....	10
Fig. 1. 4. Plantilla PVDF en forma de pentágono. ....	11
Fig. 1. 5. Diagrama eléctrico de una plantilla PVDF multicapas. ....	12
Fig. 1. 6. Plantilla PZT uniforme. ....	13
Fig. 1. 7. Prototipo del sistema PZT, que combina dos plantillas uniformes. ....	13
Fig. 1. 8. Resultados de voltaje y potencia con plantillas PVDF y PZT. Voltaje pico verde PVDF y azul PZT, y, potencia promedio rojo para ambos. ....	14
Fig. 1. 9. Desempeño de una lámina piezoeléctrica, en calzado de 1) horma dura, y, 2) horma flexible. ....	15
Fig. 2. 1. Cerámica piezoeléctrica ejes y dirección de polarización. ....	18
Fig. 2. 2. Comportamiento de los materiales piezoeléctricos. ....	23
Fig. 2. 3. Configuración típica de un sistema electrodo piezoeléctrico. ....	23
Fig. 2. 4. Polaridad de una lámina piezoeléctrica: Superior) si la fuerza estira el piezoeléctrico. Inferior) si la fuerza comprime el piezoeléctrico. ....	24
Fig. 2. 5. Esquema de funcionamiento de un Transductor piezoeléctrico. ....	31
Fig. 2. 6. Circuito eléctrico análogo al comportamiento de un sensor piezoeléctrico. ....	32
Fig. 2. 7. Circuito eléctrico modificado cargado con una impedancia. ....	34
Fig. 2. 8. Etapas del harvesting de energía en un sistema basado en transductores piezoeléctricos. ....	43
Fig. 2. 9. Diagrama de bloques funcionales para el sistema a implementar. ....	43
Fig. 2. 10. Diseño de la plantilla piezoeléctrica a implementar en este proyecto ....	44
Fig. 2. 11. Esquema de conexión eléctrica de la plantilla piezoeléctrica propuesta. ....	45
Fig. 3. 1. Arquitectura propuesta para el sistema de harvesting de energía bajo efecto piezoeléctrico, a implementar. ....	48
Fig. 3. 2. Vista frontal de un zumbador piezoeléctrico. ....	49
Fig. 3. 3. Deflexión de un zumbador piezoeléctrico. ....	50

Fig. 3. 4. Implementación del prototipo I. ....	52
Fig. 3. 5. Esquema de funcionamiento del prototipo I.....	53
Fig. 3. 6. Implementación del prototipo II. ....	54
Fig. 3. 7. Esquema de funcionamiento del prototipo II.....	55
Fig. 3. 8. Implementación del prototipo III. ....	56
Fig. 3. 9. Esquema de funcionamiento del prototipo III.....	57
Fig. 3. 10. Diseño electrónico del bloque de almacenamiento y storage de energía. ....	58
Fig. 3. 11. Circuito implementado en baquelita. ....	59
Fig. 3. 12. Caja de adaptador que contiene circuito, rectificador de señal, y, capacitor de carga.....	59
Fig. 3. 13. Integración de las plantillas piezoeléctricas, y, circuito de harvesting de energía. ....	60
Fig. 4. 1. Circuito equivalente del proceso de piezogeneración.....	68
Fig. 4. 2. Circuito electrónico de las plantillas piezoeléctricas simulado en Multisim. ....	69
Fig. 4. 3. Resultados obtenidos en la simulación del circuito electrónico de las plantillas piezoeléctricas. ....	70
Fig. 4. 4. Señal de salida de la segunda plantilla piezoeléctrica, ante una excitación manual constante, y, una carga de un solo LED. ....	72
Fig. 4. 5. Señal de salida de la segunda plantilla piezoeléctrica, ante una excitación por un caminante, y, una carga de un solo LED.....	73
Fig. 4. 6. Vista general del equipamiento utilizado para evaluar el desempeño de las plantillas piezoeléctricas alimentando un único LED. ....	74
Fig. 4. 7. Destrucción mecánica de las piezocélulas al experimentar con el tercer prototipo con perforaciones de más de 1mm de profundidad.....	76
Fig. 4. 8. Comportamiento de las plantillas para diversos pesos del caminante. ....	78
Fig. 4. 9. Vista general del equipamiento utilizado para evaluar el desempeño del tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica, alimentando una carga de 3 LEDs conectados en serie. ....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla. 1. 1. Voltaje promedio de salida en un elemento piezoeléctrico en función del peso y de la fase del paso.....	9
Tabla. 2. 1. Modos de polarización y vibración de cerámicos.....	25
Tabla. 3. 1. Especificaciones técnicas del material piezoeléctrico.....	50
Tabla. 3. 2. Especificaciones técnicas de los materiales piezoeléctricos.....	51
Tabla. 4. 1. Materiales comerciales y sus respectivas constantes.....	65
Tabla. 4. 2. Potencia generada en la segunda plantilla piezoeléctrica, durante la alimentación de un solo LED de carga. ....	73
Tabla. 4. 3. Desempeño de la primera plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga.....	75
Tabla. 4. 4. Desempeño de la segunda plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga.....	76
Tabla. 4. 5. Desempeño de la tercera plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga. ....	77
Tabla. 4. 6. Desempeño de las plantillas piezoeléctricas al alimentar un único LED de carga.....	77
Tabla. 4. 7. Desempeño del tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica al alimentar una carga de 3 LEDs conectados en serie.....	79

## RESUMEN

En el presente documento, se describe, el estado actual del proceso de harvesting de energía a través del calzado, las aproximaciones físicas más aceptables y descripción matemática de piezoelectricidad, para formalizar comprensivamente en la ingeniería de detalle de diseño, implementación, y, evaluación de un sistema de plantilla piezoeléctrica, para storage de energía, valorando de manera cualitativa y cuantitativa el desempeño energético, provisto del sistema piezoeléctrico en 3 diferentes prototipos.

**PALABRAS CLAVES:** Harvesting de energía, ingeniería de detalle, sistema de plantilla piezoeléctrica, storage de energía, desempeño energético.

## **ABSTRACT**

This project, mentions, the actual state of the process of energy harvesting through the footwear, the physical approaches and mathematical description of piezoelectricity, to formalize understandingly in the engineering of design, implementation, and, evaluation of a piezoelectric insole system to energy storage, valuing in a quantitation and qualitative way how the energy acts of 3 different prototypes of piezoelectric system.

**KEY WORDS:** Energy harvesting, detail engineering, piezoelectric, insole system, storage energy, acting energy.

## INTRODUCCIÓN

El harvesting es el proceso por el cual se captura y almacena fracciones de energía "suelta". Una forma de energía potencialmente cosechable es la humana, especialmente la empleada para la locomoción. Los sistemas de efecto piezoeléctrico son ampliamente utilizados para capturar esta energía, especialmente a través del calzado.

Con el despertar de la conciencia por el cuidado del medio ambiente, la utilización de dispositivos capaces de generar energía aprovechando la locomoción humana, se convierte en un tema actual y prospectivo.

En el primer capítulo, se describe el estado actual del harvesting de energía al caminar, a través del calzado.

En el segundo capítulo, se detalla las aproximaciones físicas más aceptadas de la piezoelectricidad, y, se describe matemáticamente el proceso de captura y transformación de energía en los piezoeléctricos, de cara a reducir la subjetividad del diseño de sistemas de harvesting de energía a través del calzado.

En el tercer capítulo, se describe y se explica la ingeniería de detalle de un sistema piezoeléctrico para la captura de energía en el calzado.

En el cuarto capítulo, se analiza el desempeño de las plantillas piezoeléctricas diseñadas, en base a la aproximación matemática de la capacidad de generación de energía.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Diseñar e implementar un sistema de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía, a través del calzado.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el estado actual del harvesting de energía al caminar.
- Detallar la ingeniería de diseño de un sistema de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía, a través del calzado.
- Implementar un sistema de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía, a través del calzado.
- Analizar el desempeño de 3 prototipos de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía en el calzado, propuestas por el grupo de trabajo.

## **CAPÍTULO 1**

### **GENERALIDADES DEL HARVESTING DE ENERGÍA A TRAVÉS DEL CALZADO**



## 1.1 Introducción

Con el despertar de la conciencia por el cuidado del medio ambiente, la utilización de dispositivos capaces de generar energía aprovechando la locomoción humana, se convierte en un tema actual y prospectivo [1], [2].

En 1995, los laboratorios de investigación sobre cosecha de energía residual del MIT, realizaron estudios para determinar las partes del cuerpo humano, de mayor potencial de aprovechamiento, concluyendo que del choque del talón era factible obtener energía. Las pruebas mostraron que una persona de 68 kg de peso, podría generar hasta 67 W de potencia, durante una marcha de paso rápido (2 pasos por segundo), bajo ciertas condiciones [3]. En los estudios se emplearon ingenios de baja frecuencia adecuados en el calzado.

Actualmente, se puede encontrar en el mercado diferentes aplicaciones que utilizan el efecto piezoeléctrico para capturar energía a través del calzado, y, que proveen de energía a cargas de bajo consumo como baterías, lámparas, y, otras. Todo esto es posible gracias a los materiales piezoeléctricos, y, al apareamiento de dieléctricos elásticos y generadores rotatorios [1], [4].

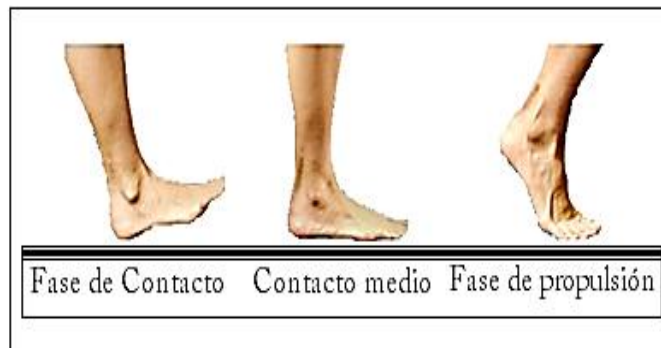
En este capítulo, se describe el estado actual del harvesting de energía al caminar, a través del calzado.

## 1.2 Generalidades del harvesting de energía a través del calzado

### 1.2.1 Breves nociones sobre la locomoción humana.

La biomecánica ayuda a describir el “ciclo de la marcha”, proceso repetitivo en la locomoción humana. Tal como la muestra la Fig. 1. 1, en un paso completo se presentan cinco fases [5], [6]:

- Contacto del talón, cuando el talón empieza a hacer contacto con el suelo.
- Apoyo plantar, cuando la parte anterior del pie hace contacto con el suelo.
- Apoyo medio, cuando el trocánter mayor se encuentra alineado verticalmente con el centro del pie, visto desde el plano sagital (el peso total recae sobre el pie).
- Elevación del talón.
- Despegue del pie, cuando los dedos se elevan del suelo.



**Fig. 1. 1.** Intervalos de la fase de apoyo. CT: Contacto del talón, AP: Apoyo plantar, AM: Apoyo medio, ET: Elevación del talón, DP: Despegue del pie. Intervalos: Aceptación del peso, Apoyo medio y Despegue del pie. Fuente: Tomado de [5], [6].

Al considerar el balanceo, durante el cual solo un pie se esfuerza mientras que el otro se encuentra en el aire por unos segundos, a las fases descritas se debe añadir tres momentos adicionales [6], [7]:

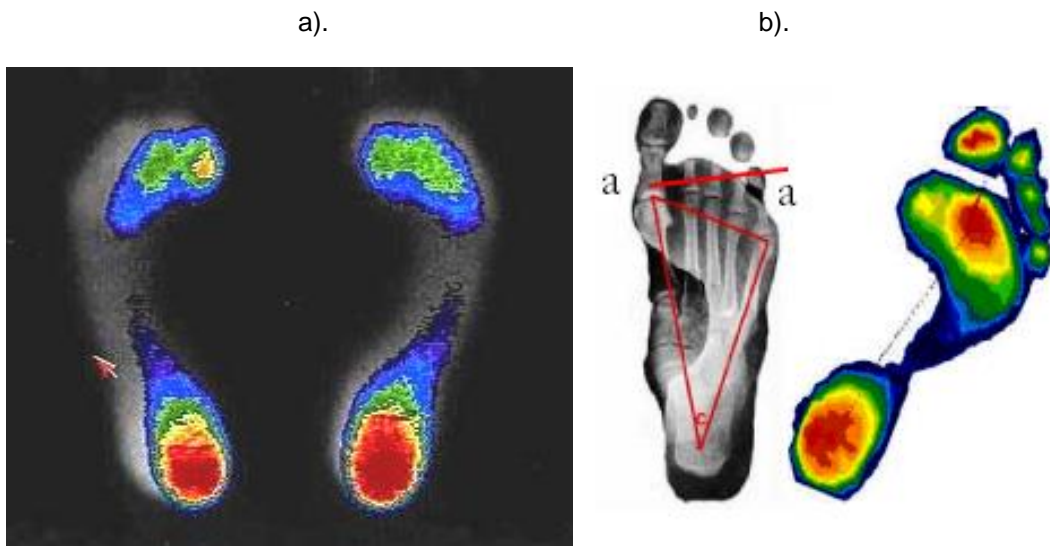
- La aceleración, en la que los dedos dejan el suelo.
- El balanceo medio, en la que el pie queda en péndulo sin tocar el suelo, propiciado a que el otro pie sea el de apoyo.
- La desaceleración, que permite llegar al paso siguiente en forma sostenida.

En cada una de estas fases de un paso completo, las fuerzas actúan de forma equilibrada, distribuida, y, proporcionada. Cuando una persona está de pie, el peso total se distribuye entre las dos piernas, mientras que cuando camina, durante una fracción de tiempo el peso total es soportado por una sola pierna [6].

### 1.2.2 Uso de plantillas piezoeléctricas.

El pie está constituido por 26 huesos, 33 músculos, y, más de 100 ligamentos, diseñados para soportar el peso y la distribución de carga corporal. En el sistema también se incluyen articulaciones (que le confieren una estructura semi-rígida), un complejo sistema vascular arterial, y, una red nerviosa. Todo esto permite que el pie posea la sensibilidad y operatividad para realizar complicados movimientos sobre toda clase de superficie [8].

La **baropodometría** estudia la presión plantar durante el apoyo del cuerpo, mantención del equilibrio, y, el inicio de la marcha, empleando diversas técnicas como el uso de plataformas de sensores triaxiales, sensores tipo plantilla, hidroceldas, micro cápsulas, entre otras [9], [10]. Estudios realizados con FSR, un sistema de sensores piezoresistivos [8], han definido las áreas de mayor presión plantar en reposo y durante la marcha, registrando valores entre 1 y 1,3 Kg/cm<sup>2</sup> (ver Fig. 1. 2), mientras que otros ensayos [6] han permitido aproximar la relación entre el peso y energía generada sobre baldosas piezoeléctricas (ver Tabla. 1. 1).



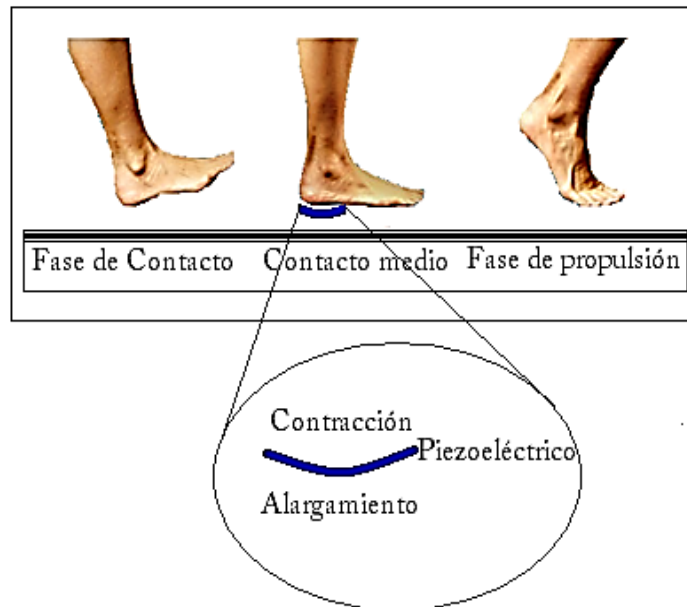
**Fig. 1. 2.** Áreas de mayor presión en el pie: a) en reposo, b) al caminar.  
Fuente: Tomado de [8].

**Tabla. 1. 1.** Voltaje promedio de salida en un elemento piezoeléctrico en función del peso y de la fase del paso.

Altura (m)	Peso (Kg)	Voltaje promedio de salida (V)		
		Contacto del talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
0,60	12	-15,07	-8,40	1,33
1,20	25	-26,72	-15,34	2,33
1,40	38	-41,49	-27,47	3,91
1,50	45	-61,03	-34,99	9,04
1,55	50	-67,3	-35,91	9,01
1,75	58	-71,05	-46,26	7,45
1,60	60	-73,47	-37,28	8,51
1,55	70	-108,24	-63,043	9,40
1,78	116	-163,21	-79,77	13,15

Fuente: Tomado de [6].

Con la intención de concentrar las fuerzas de acción y reacción, facilitando la contracción y la elongación del material piezoeléctrico ubicado en el calzado, se utiliza plantillas que actúan como filtros pasa bajas. Durante la marcha, se producen deformaciones diferentes por encima y por debajo de la plantilla piezoeléctrica (Ver Fig. 1. 3), lo que provoca una diferencia de potencial entre las capas, y cuya energía es capturada por el sistema de harvesting.



**Fig. 1. 3.** Contracción y elongación del material piezoeléctrico alrededor de la plantilla.  
Fuente: tomado de [5], [6].

La revisión bibliográfica muestra que, los cerámicos y los polímeros son los piezoeléctricos preferidos al momento de diseñar plantillas para potenciar el harvesting de micro energía.

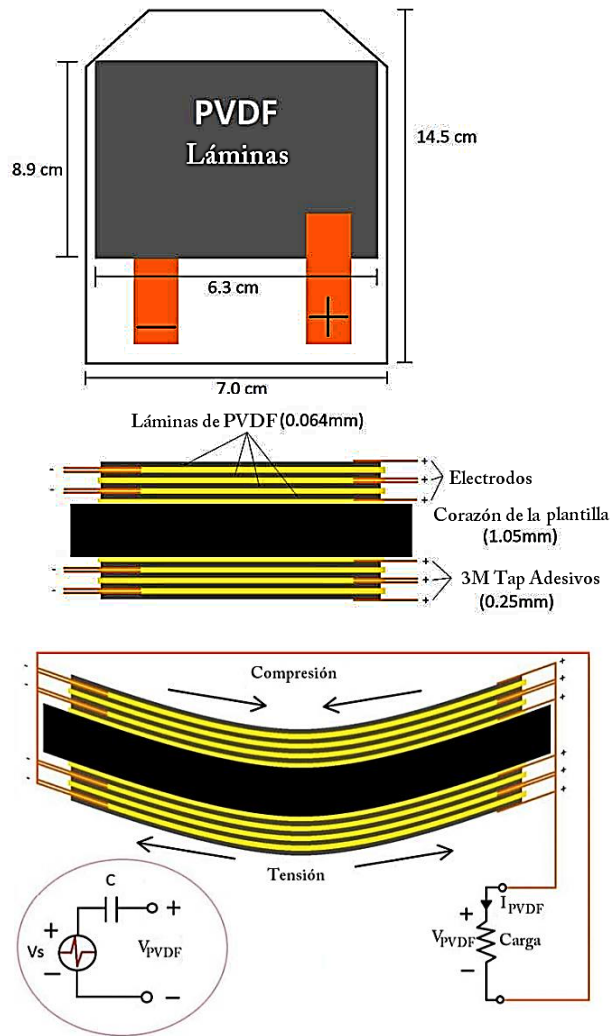
#### **1.2.2.1 Plantilla de polifluoruro de vinilideno PVDF.**

Esta plantilla piezoeléctrica tiene forma de una duela bimorfa (ver Fig. 1. 4). Sobre un sustrato de plástico flexible, se deposita 28 micras de material piezoeléctrico, y, se despliegan 8 multicapas por debajo y por encima. La estructura final tiene la forma de un pentágono, y, se ajusta en el calzado, en la región de presión del talón [11].



**Fig. 1. 4.** Plantilla PVDF en forma de pentágono.  
Fuente: tomada de [11].

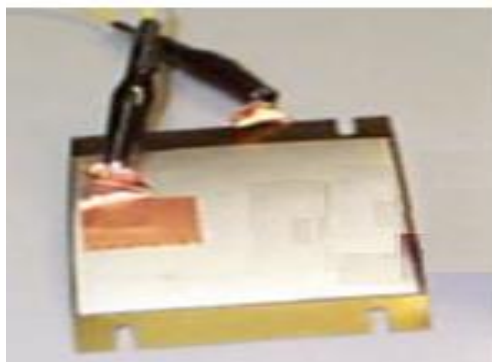
La multicapas ubicadas una sobre otra, y, conectadas en paralelo, se deforman al mismo tiempo. Esto hace que disminuya la impedancia característica del sistema, y, que se produzca una capacitancia neta máxima acompañada de una alta corriente. La Fig. 1. 5, muestra el diagrama eléctrico de esta plantilla.



**Fig. 1. 5.** Diagrama eléctrico de una plantilla PVDF multicapas.  
Fuente: tomada de [11].

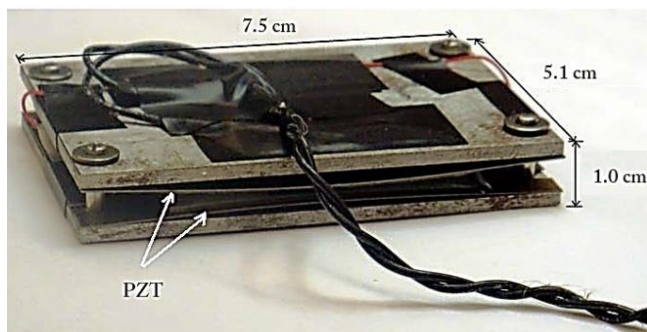
### 1.2.2.2 Plantilla de zirconato titanato de plomo PZT.

Esta plantilla de diseño semi-curvo, fue desarrollada por la NASA. Consta de una tira de acero uniforme, unida a un parche de cerámica piezoeléctrica modificada, que le permite cierto rango de flexibilidad (Ver Fig. 1. 6) [11].



**Fig. 1. 6.** Plantilla PZT uniforme.  
Fuente: tomada de [11].

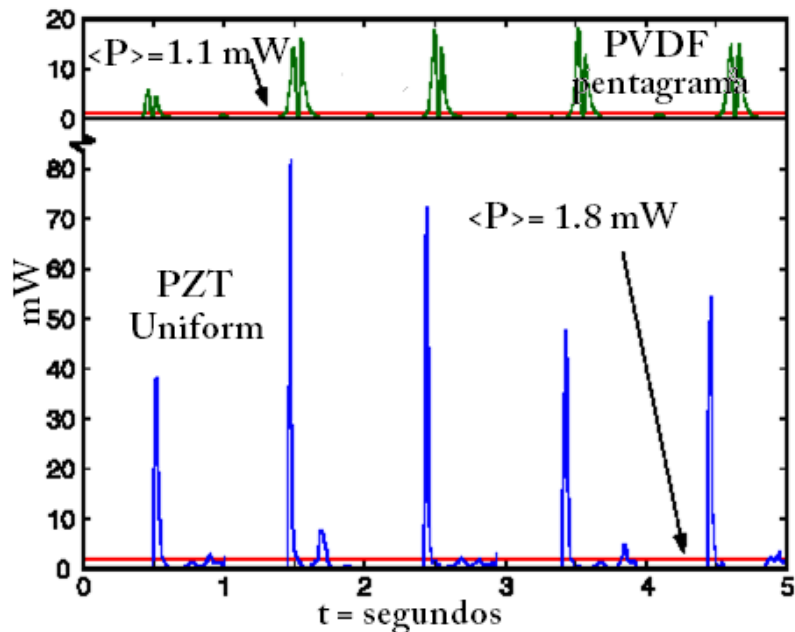
La superficie rígida de la plantilla, facilita a una gran deformación y elongación del material piezoeléctrico, lo que influye en los valores del voltaje pico y de potencia promedio. Este efecto puede ser optimizado, empleando estructuras como la mostrada en la Fig. 1. 7, en la que se combinan dos plantillas PZT.



**Fig. 1. 7.** Prototipo del sistema PZT, que combina dos plantillas uniformes.  
Fuente: tomada de [12].

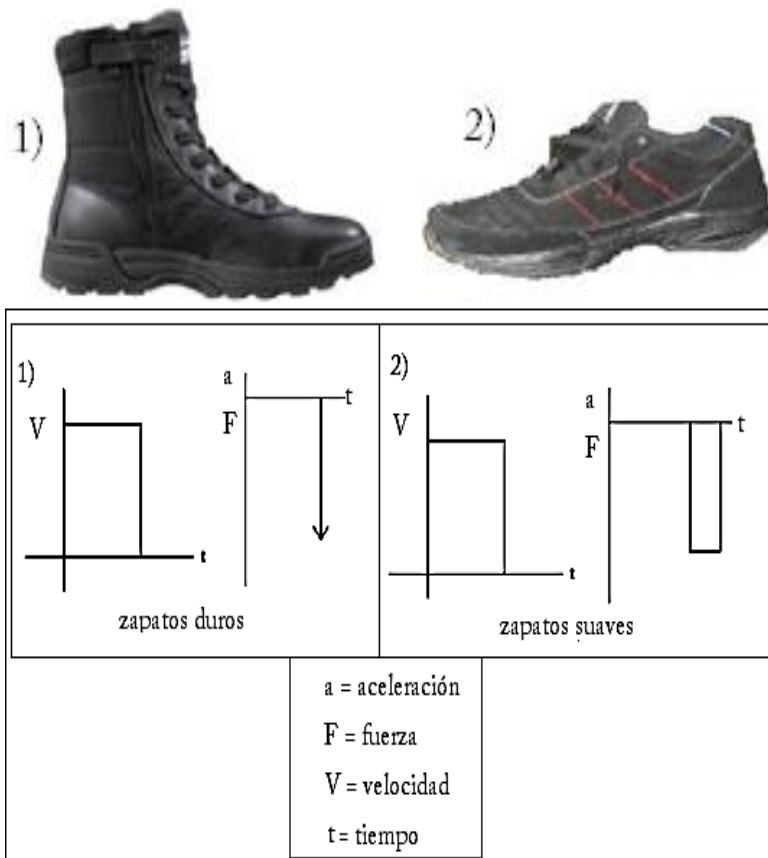
La Fig. 1. 8 muestra los resultados obtenidos en pruebas efectuadas con plantillas PVDF y PZT, en condiciones similares. Los resultados muestran un mejor desempeño de la plantilla PZT.





**Fig. 1. 8.** Resultados de voltaje y potencia con plantillas PVDF y PZT. Voltaje pico verde PVDF y azul PZT, y, potencia promedio rojo para ambos.  
Fuente: tomada de [11].

El uso de diferente tipo de calzado, modifica el sistema de fuerzas de reacción en contraposición a la marcha humana. La mejor performance en un piezoeléctrico se logra en calzado de horma flexible, por cuanto una mayor deformación, y, una pronta recuperación de la forma original, facilitan la generación de un mayor tren de pulsos de energía (Ver Fig. 1. 9) [9], [12].



**Fig. 1. 9.** Desempeño de una lámina piezoeléctrica, en calzado de 1) horma dura, y, 2) horma flexible.  
Fuente: tomada de [9], [12].

### 1.2.3 Algunas aplicaciones del harvesting de energía a través del calzado para provisión de energía.

Láminas piezoeléctricas permiten obtener información que, al ser procesada vía software, facilita el reconocimiento de la posición relativa de los pies, el esfuerzo en el pie, la forma de las pisadas, etc. En este tipo de aplicaciones, las láminas piezoeléctricas se conectan a dispositivos móviles vía bluetooth de bajo consumo. En ambientes dinámicos, sistemas de harvesting de energía a través del calzado, permiten activar ID inalámbricos de corto alcance [13], proveer de energía a celulares [14], etc.

## **CAPITULO 2**

### **PIEZOELECTRICIDAD Y HARVESTING DE ENERGÍA A TRAVÉS DEL CALZADO**

## **2.1 Introducción**

Al analizar el comportamiento de la piezoelectricidad, es importante conocer la naturaleza del elemento accionante y del elemento accionado, y, entender la interacción entre ambos [15].

En este capítulo, se detalla las aproximaciones físicas más aceptadas de la piezoelectricidad, y, se describe matemáticamente el proceso de captura y transformación de energía en los piezoeléctricos, de cara a reducir la subjetividad del diseño de sistemas de harvesting de energía a través del calzado.

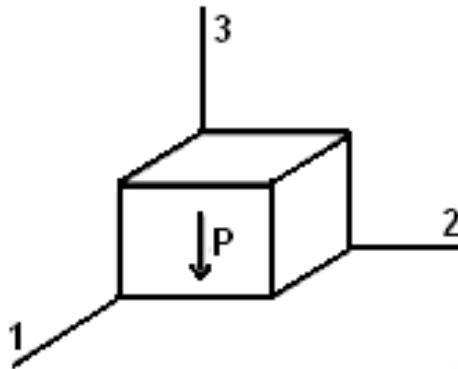
## **2.2 Generalidades de la piezoelectricidad**

Se describe a la piezoelectricidad como la propiedad de algunos materiales, de polarizarse eléctricamente, ante una fuerza deformativa externa. Esta propiedad fue descubierta por Jacques y Pierre Curie, en 1880, quienes determinaron que ciertos materiales al deformarse por acción de una fuerza, sufrían una polarización eléctrica proporcional a la fuerza aplicada [1], [5].

Durante la deformación - generación piezoeléctrica, no toda la energía mecánica se convierte en eléctrica. La regresión del material a su estado natural, provoca que parte de la energía se acumule elásticamente (como en un resorte), y, que otra sea convertida en cargas que generan un campo eléctrico [16].

### 2.2.1 Polarización piezoeléctrica.

La revisión bibliográfica muestra, que los materiales piezoeléctricos fabricados, pueden polarizarse en 3 direcciones análogas posibles (x y z), aceptándose que el tercer eje es paralelo al sentido de polarización (ver Fig. 2. 1).



**Fig. 2. 1.** Cerámica piezoeléctrica ejes y dirección de polarización.  
Fuente: tomado de [5].

Las propiedades piezoeléctricas del material, son descritas por un sistema de símbolos y notaciones, en el que el subíndice 1 indica el eje "x", el subíndice 2 refiere al eje "y", y, el subíndice 3 señala al eje "z".

### 2.2.2 Constantes piezoeléctricas.

Las constantes piezoeléctricas se relacionan con las propiedades de los materiales piezoeléctricos [17].

### **2.2.2.1 Constante de carga piezoeléctrica d.**

La constante de carga piezoeléctrica d, se mide en m/V (metros/Voltio), ó, C/N (Culombio/Newton). Esta característica indica la proporción entre la variación dimensional ( $\Delta l$ ) del material piezoeléctrico (m), y, la diferencia de potencial aplicada (V); ó, la relación entre la generación de cargas eléctricas (C), y, la fuerza aplicada en el material (N) (ver expresiones (1) y (2)).

Para cerámicas piezoeléctricas de PZT, esta constante tiene valores típicos de 0,2 a 8 Å por V aplicado, y, de 20 a 800  $\mu\text{C}$  por N aplicado.

$$d = \frac{\text{variación dimensional}}{\text{potencial aplicado}} \quad (1)$$

$$d = \frac{\text{densidad de cargas}}{\text{fuerza aplicada}} \quad (2)$$

### **2.2.2.2 Constante de tensión piezoeléctrica g.**

La constante de tensión piezoeléctrica g, es la relación entre el campo eléctrico creado en una cerámica de longitud 1 m, y, el esfuerzo mecánico aplicado (ver expresión (3)). Se mide en Vm /N.

Para los PZT, esta constante tiene valores típicos de -1 a 60 V por N aplicado.

$$g = \frac{\text{campo desarrollado}}{\text{esfuerzo mecánico aplicado}} \quad (3)$$

### **2.2.2.3 Coeficiente de acoplamiento K.**

La constante de acoplamiento K es una unidad adimensional, que muestra la eficiencia del material en la transducción, ó, la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa (ver expresiones (4) y (5)).

Para los PZT, esta constante tiene valores típicos de 0.02 (2% de eficiencia) a 0.75 (75% de eficiencia).

$$K = \sqrt{\frac{\text{energía mecánica almacenada}}{\text{energía eléctrica aplicada}}} \quad (4)$$

$$K = \sqrt{\frac{\text{energía eléctrica almacenada}}{\text{energía mecánica aplicada}}} \quad (5)$$

### **2.2.2.4 Factor de calidad mecánico Q.**

El factor de calidad mecánico Q, es una unidad adimensional, que muestra la medida del amortiguamiento en el material.

Para los PZT, este factor tiene valores típicos de 50 a 1500.

### **2.2.2.5 Factor de disipación tan δ.**

El factor de disipación tanδ, es una unidad adimensional, que muestra el potencial dieléctrico del material.

Para los PZT, este factor tiene valores típicos de 2 a  $25 \times 10^{-3}$

### **2.2.2.6 Temperatura de Curie TC.**

La temperatura de Curie TC, indica la temperatura límite que soporta una estructura cristalina de piezoeléctrico. Al exceder esta temperatura, se pierden las propiedades piezoeléctricas y la polarización inducida en el material. El piezoeléctrico se torna inservible como transductor de energía eléctrica en mecánica.

Para los PZT, esta temperatura tiene valores típicos de 150 a 350 ° C.

### **2.2.2.7 Constante de frecuencia N.**

La constante de frecuencia N estima la frecuencia de resonancia de los dispositivos piezoeléctricos.

Para los PZT, esta constante tiene valores típicos de 800 a 3000 Hz/m.

## **2.2.3 Tipos de materiales piezoeléctricos.**

De acuerdo a la bibliografía [5], existen 6 tipos de materiales piezoeléctricos.

El **Navy Type I** (“Hard”), es un material usado en aplicaciones de media y alta potencia, en condiciones de uso continuo y repetitivo. Este material es capaz de generar altas amplitudes de vibraciones, manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas. Se utiliza en sistemas de limpieza por ultrasonido y sonares. Comercialmente, se conoce como PZT-4.



El **Navy Type II** (“Soft”), es un material que posee alta sensibilidad. Este material es ideal para la transmisión y recepción en dispositivos de baja potencia. Presenta pérdidas dieléctricas y mecánicas que, impiden la excitación continua con alta intensidad. Se emplea en ensayos no destructivos, como hidrófonos y acelerómetros. Comercialmente, se conoce como PZT-5A.

El **Navy Type III** (“Hard”), es un material de características similares al Navy Type I, pero menos sensible, capaz de convertir el doble de potencia, manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas. Es recomendado en aplicaciones que precisen de alta potencia, como sistemas de soldadura por ultrasonidos y procesamiento. Comercialmente, se conoce como PZT-8.

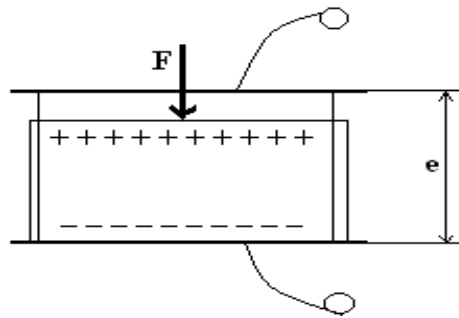
El **Navy Type IV** (“Soft”), es un material adecuado para aplicaciones de potencia media, como manutención de equipos antiguos. Se conoce en el mercado, como titanato de bario.

El **Navy Type V** (“Soft”), es un material adecuado para aplicaciones que requieren alta energía y diferencia de potencial, como detonadores de impacto. Comercialmente, se conoce como PZT-5J.

El **Navy Type VI** (“Soft”), es un material adecuado para aplicaciones que requieren grandes deformaciones mecánicas, como actuadores y posicionadores. Comercialmente, se conoce como PZT-5H.

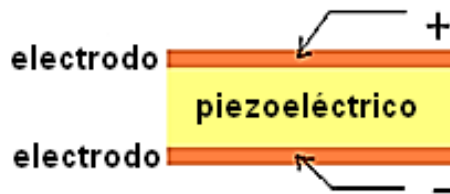
#### **2.2.4 Efecto piezoeléctrico.**

En un material piezoeléctrico, la compresión o tensión aplicada, hace que la distancia entre los dipolos de la estructura piezoeléctrica cambie, y, que se cree un campo eléctrico, y, como resultado, carga en la superficie [2]. Este proceso físico, conocido como efecto piezoeléctrico, determina la conversión energética en materiales PZT o PVDF [1], [18], [19].



**Fig. 2. 2.** Comportamiento de los materiales piezoeléctricos.  
Fuente: tomada de [19].

La piezoelectricidad se extrae, a través de chapas o electrodos en las superficies del material. Chapas de plata o cobre, integran un tipo de capacitor con placas paralelas, donde el piezoeléctrico actúa como dieléctrico, reaccionando frente a la excitación externa [20] (ver Fig. 2. 3).



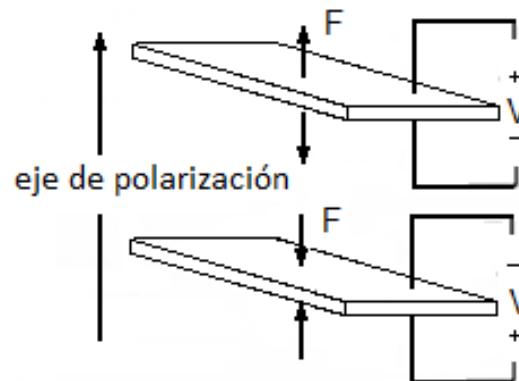
**Fig. 2. 3.** Configuración típica de un sistema electrodo piezoeléctrico.  
Fuente: tomada de [20].

El **efecto piezoeléctrico directo**, se exhibe cuando una fuerza o vibración mecánica en el piezoeléctrico genera una carga o voltaje entre sus terminales [4]. La polaridad del material depende del tipo de esfuerzo.

El **efecto piezoeléctrico inverso** aparece, cuando aplicando un campo eléctrico o voltaje al piezoeléctrico se produce un cambio dimensional o deformación. La dirección del campo depende de la dirección de polarización [4].

### 2.2.5 Polaridad de carga.


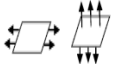






Específicamente en el efecto directo, la polaridad de carga depende del tipo de esfuerzo, tal como muestra la Fig. 2. 4. Es posible obtener una diferencia de potencial o voltaje, con la misma polaridad que el eje de la lámina, ante una descompresión o estiramiento del material piezoeléctrico; ó, una diferencia de potencial o voltaje, opuesta al eje de la lámina, por la compresión del material piezoeléctrico.



**Fig. 2. 4.** Polaridad de una lámina piezoeléctrica: Superior) si la fuerza estira el piezoeléctrico. Inferior) si la fuerza comprime el piezoeléctrico.  
Fuente: tomado de [10].

El comportamiento electromecánico de todo material piezoeléctrico, presenta modos de vibración y polarización, determinados por la geometría del mismo elemento y sus propiedades mecánico elástica (ver Tabla 2. 1).

**Tabla. 2. 1.** Modos de polarización y vibración de cerámicos.

Forma	Ejes	Polarización	Voltaje	Modos de vibración
Placa		↑	↕	
Disco fino				
Cubo				
Tubo				

Fuente: tomado de [21].

### 2.2.6 Ecuaciones Piezoeléctricas.

El comportamiento piezoeléctrico está ligado al reacomodamiento, durante la deformación, de partículas cargadas eléctricamente.

Cuando existen dos partículas cargadas eléctricamente en igual magnitud ( $q$ ), y, distinto signo, separadas por una distancia ( $l$ ), se produce un momento eléctrico o momento dipolar, tal como lo muestra la ecuación característica (6) [20].

$$p = ql \quad (6)$$

En dónde,

$p$ , es el momento eléctrico, momento dipolar.

$l$ , es la distancia medida desde la carga negativa hacia la positiva, m.

$q$ , es la carga, C.

En la deformación, el campo eléctrico se manifiesta como una diferencia de potencial, determinada por la expresión (7).

$$E = -\Delta V \quad (7)$$

#### ***2.2.6.1 Ecuaciones para el efecto piezoeléctrico directo.***

El dipolo eléctrico medio ( $P$ ), desarrollado por una tensión extensiva ( $T$ ), paralela a su eje de polarización, se describe por la expresión (8).

$$P = dT \quad (8)$$

En dónde,

$P$ , el dipolo eléctrico medio, C/m<sup>2</sup>, N/Vm.

$d$ , es constante de carga piezoeléctrica a tensión C/N, ó, m/V.

$T$ , es la tensión aplicada, N/m<sup>2</sup>.

En función del campo eléctrico (E), y, del desplazamiento eléctrico, el dipolo se expresa a través de la ecuación (9).

$$P = D - \epsilon^T E \quad (9)$$

En dónde,

P, es el dipolo, C/m<sup>2</sup>, N/Vm.

D, es el desplazamiento eléctrico, C/m<sup>2</sup>.

$\epsilon$ , es permitividad dieléctrica, C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>.

E, es el campo eléctrico, V/m, ó, N/C.

Como resultado, un *transductor piezoeléctrico*, se describe matemáticamente, a través de las expresiones (10) y (11).

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (10)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\epsilon^T} \quad (11)$$

En dónde,

D, es el desplazamiento eléctrico por fuerza aplicada, C/m<sup>2</sup>.

d, es constante de carga piezoeléctrica a tensión, C/N, ó, m/V.

T, es la tensión aplicada, N/m<sup>2</sup>.

$\epsilon^T$  es la permisividad a tensión constante, C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>.

E, es el campo eléctrico, V/m, ó, N/C.

g, es constante de tensión piezoeléctrica, Vm/N.

### ***2.2.6.2 Ecuaciones para el efecto piezoeléctrico indirecto.***

El material piezoeléctrico, al estar sometido a un campo eléctrico, se deforma, proceso descrito matemáticamente por la ecuación (12).

$$S = dE \quad (12)$$

En dónde,

S, es la deformación mecánica.

d, es constante piezoeléctrica a tensión C/N, ó, m/V.

E, es el campo eléctrico V/m, ó, N/C.

$$S = gD \quad (13)$$

En dónde,

S, es la deformación mecánica.

$g = \frac{d}{\epsilon_T}$ , es constante de tensión piezoeléctrica, Vm/N.

D, es el desplazamiento eléctrico, C/m<sup>2</sup>.

El alargamiento experimentado en un medio elástico sujeto a tensión, sigue la ley de Hooke, y, se expresa por la ecuación (14).

$$S = sT \quad (14)$$

En dónde,

S, es la deformación mecánica.

T, es la tensión aplicada, N/m<sup>2</sup>.

s, es la compilación del medio, m<sup>2</sup>/N.

Como resultado, una *actuador piezoeléctrico*, se describe a través de las ecuaciones (15) y (16).



$$S = s^E T + dE \quad (15)$$

$$S = s^D T + gD \quad (16)$$

En dónde,

S, es la deformación mecánica.

$s^E$ ,  $s^D$  son las conformidades específicas elásticas, para un campo eléctrico constante.

$s^D$ , es la flexibilidad que se produce bajo un desplazamiento dieléctrico constante, y,  $s^E$ , es la flexibilidad bajo un campo eléctrico constante,  $m^2/N$ .

T, es la tensión aplicada,  $N/m^2$ .

d, es constante de carga piezoeléctrica a tensión,  $C/N$ , ó,  $m/V$ .

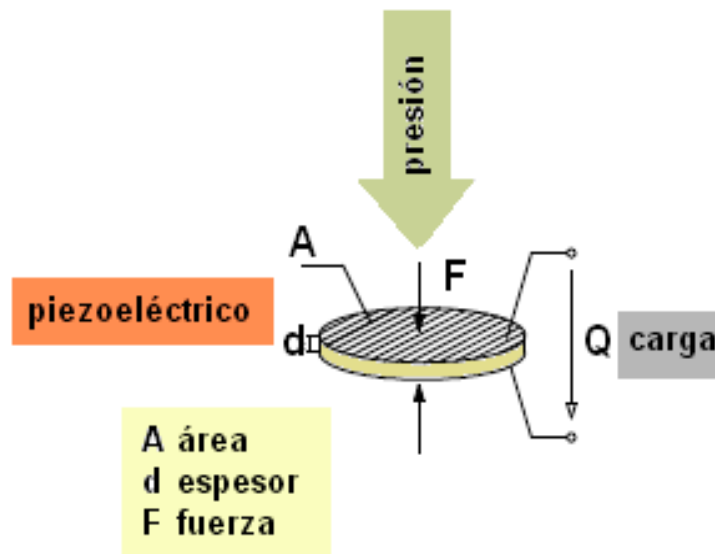
E, es el campo eléctrico,  $V/m$ , ó,  $N/C$ .

g, es constante de tensión piezoeléctrica,  $Vm/N$ .

D, es el desplazamiento eléctrico por fuerza aplicada,  $C/m^2$ .

### 2.3 Generadores piezoeléctricos

Los transductores piezoeléctricos son elementos de alta eficiencia, debido a las mínimas pérdidas por fricción, por temperatura, entre otras [15], [16]. A partir de una entrada mecánica, los transductores piezoeléctricos, convierten la presión sana en voltaje eléctrico (ver Fig. 2. 5) [22] [23].

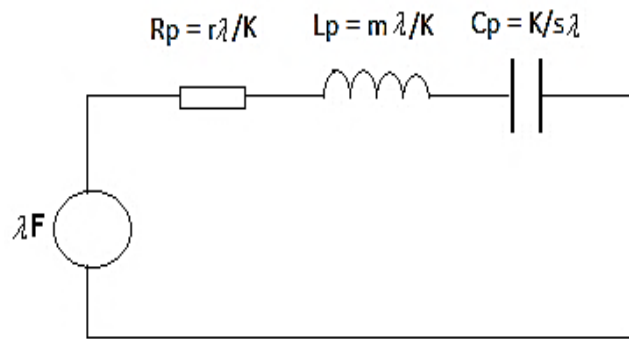


**Fig. 2. 5.** Esquema de funcionamiento de un Transductor piezoeléctrico.  
Fuente: tomada de [22], [23].

La eficiencia de la conversión de energía en el piezoeléctrico, depende de factores como la variación de la fuerza aplicada, la impedancia de la carga conectada al generador (que podría depolarizarlo [1]); y, del comportamiento inercial, elástico, y, viscoso del material (que provocan fuerzas de contraposición [24]).

### 2.3.1 Materiales piezoeléctricos como generadores.

Cerca de la resonancia mecánica, un material piezoeléctrico se puede caracterizar por el circuito equivalente mostrado en la Fig. 2. 6, [19], [25].



**Fig. 2. 6.** Circuito eléctrico análogo al comportamiento de un sensor piezoeléctrico.  
Fuente: Tomado de [16].

La suma de los comportamientos inercial, elástico, y, viscoso del material, provoca la aparición de fuerzas que contrarrestan el efecto de la fuerza aplicada, tal como se describe en la fórmula (17).

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + sx \quad (17)$$

En dónde,

$m$ , es la masa del material, kg.

$r$ , es el coeficiente de rozamiento (viscosidad), Pa \* s.

$s$ , es el coeficiente elástico, m<sup>2</sup>/N.

$x$ , es la deformación total producida, N/m.

El efecto piezoeléctrico, provoca la aparición de carga directamente proporcional a la deformación producida, ( $x$ ), inversamente proporcional al espesor ( $e$ ) del material, tal como lo muestra la expresión (18).

$$q = \frac{k'}{e} x \quad (18)$$

En dónde,

q, es la carga, C.

e, es la distancia de separación de los electrodo, m.

k', es un constante de variabilidad de la deformación producida, C/N.

x, es la deformación total producida, N/m.

Si los terminales del dispositivo piezoeléctrico se cierran sobre un circuito, aparece una corriente eléctrica descrita por la expresión (19). La corriente es proporcional a la velocidad de variación de la deformación.

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{k'}{e} \frac{dx}{dt} = k \frac{dx}{dt} \quad (19)$$

Con estas consideraciones, la ecuación (17) se convierte en la expresión (20), que describe la operación de un circuito RLC, en serie, con una fuente de voltaje.

$$F = \frac{m}{K} \frac{di}{dt} + \frac{r}{K} i + \frac{s}{K} \int i dt \quad (20)$$

Al aplicar la expresión (20) al circuito mostrado en la Fig. 2. 6, se obtiene la expresión (21).

$$v = \lambda F = R_p i + L_p \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_p} \int i dt \quad (21)$$

En dónde,

$\lambda$ , es el factor de conversión dimensional.

$v$ , es potencial de salida, V.

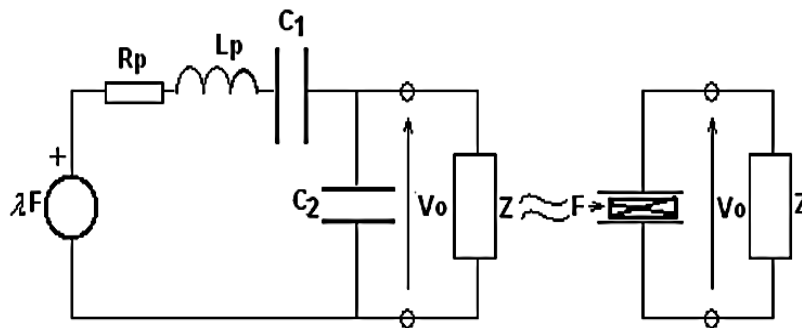
$F$ , es la fuerza aplicada, N.

$R_p$ , es la resistencia característica del piezoeléctrico,  $\Omega$ .

$L_p$ , es la inductancia del piezoeléctrico, H.

$C_p$ , es la capacitancia del piezoeléctrico, C.

En el circuito equivalente, el comportamiento piezoeléctrico se describe a través de la variabilidad de la capacitancia del material ( $C_p$ ), representada por dos capacitores  $C_1$  y  $C_2$  (ver Fig. 2. 7).



**Fig. 2. 7.** Circuito eléctrico modificado cargado con una impedancia.

Fuente: tomada de [19].

El equivalente en serie de los capacitores  $C_1$  y  $C_2$ , forma la capacidad del piezoeléctrico  $C_p$ , y, el equivalente en paralelo representa la capacidad construida  $C$ , definidas ambas por las expresiones (22) y (23) [19] [26].

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (22)$$

$$C = C_1 + C_2 \quad (23)$$

Considerando las equivalencias señaladas en el circuito eléctrico analógico equivalente, las expresiones (22) y (23), se pueden convertir en las ecuaciones (24) y (25).

$$C_2 = \frac{C + \sqrt{C^2 - 4\frac{k}{\lambda s}C}}{2} \quad (24)$$

$$C_1 = \frac{C - \sqrt{C^2 - 4\frac{k}{\lambda s}C}}{2} \quad (25)$$

En dónde,

$C_p$ , es la capacidad del piezoeléctrico, F.

$C$ , es la capacidad física del dispositivo, F.

$C_1$ , es la capacidad equivalente de  $C_p$ , F.

$C_2$ , es la capacidad equivalente de  $C_p$ , F.

En el circuito equivalente (ver Fig. 2. 7), el voltaje de salida sin impedancia externa, se describe por la ecuación (26).

$$V_0 = \lambda F \frac{C_p}{C_2} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 L_p C_p)^2 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}} \quad (26)$$

En donde  $\lambda$ , es el factor de conversión dimensional.

Sustituyendo  $L_p$ ,  $R_p$ ,  $C_p$  en (26), se obtiene la expresión (27).

$$V_0 = \frac{ke}{\epsilon A} \frac{1}{\sqrt{(s - \omega^2 m)^2 + \omega^2 r^2}} F \quad (27)$$

En donde,

$V_0$ , es la tensión de salida, V.

$e$ , es la distancia de separación de los electrodos, m.

$\epsilon$ , es la permitividad dieléctrica, C/m.

$A$ , es la superficie del material,  $m^2$ .

$s$ , es el coeficiente elástico,  $m^2/N$ .

$\omega$ , es la correspondiente a frecuencia, Hz.

$m$ , es la masa del piezoeléctrico, kg

$r$ , es el coeficiente de rozamiento (viscosidad).

$F$ , es la fuerza aplicada, N.

Finalmente la frecuencia del piezoeléctrico ( $f_0$ ), está representada por la expresión (29).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{m}{s}}} F \quad (28)$$

### **2.3.2 Conversión y conservación de energía en un piezogenerador PZT.**

En el harvesting de energía en transductores piezoeléctricos PZT, se identifica 4 etapas: mecánica, conversión mecánica-eléctrica, conversión eléctrica-eléctrica, y, conservación eléctrica a carga.

#### ***2.3.2.1 Mecánica.***

Mecánicamente, se reconoce 2 tipos de entradas accionantes: una fuerza estática, que genera un pulso de salida, y, una fuerza dinámica, más real, de igual magnitud, que engendra un tren de pulsos casi estables a un nivel.

Frente a las entradas accionantes, el transductor piezoeléctrico se excita, reacción definida como esfuerzo o stress, y, que se explica a través de la expresión (29) [19], [24].



$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (29)$$

En dónde,

$\sigma$ , es el nivel de stress del material,  $\frac{N}{m^2}$ .

F, es la fuerza aplicada sobre el material, N.

A, es el área del generador,  $m^2$ .

La acción y reacción frente al transductor, determinan el comportamiento de la señal de salida [24].

### ***2.3.2.2 Conversión mecánica – eléctrica.***

Las entradas estáticas o dinámicas producen diferentes reacciones en un transductor piezoeléctrico [24], [27]:

**Generación de carga eléctrica** entre las superficies, del material, definida por la expresión (30).

$$Q = Fd_{33} \quad (30)$$

En dónde,

Q, es la carga producida, C.

F, es la fuerza aplicada, N.

$d_{33}$ , es la polarización inducida por unidad de esfuerzo aplicado en la dirección 3, C/N.

**Voltaje de salida**, en función de las constantes piezoeléctricas, determinado por la expresión (31).

$$V = \frac{d_{33} d}{e_{33} e} F \quad (31)$$

En dónde,

V es el voltaje obtenido, V.

$d_{33}, e_{33}$  representan constantes piezoeléctricas, C/N.

d, representa el grosor del piezoeléctrico, m.

A, es el área del material piezogenerador,  $m^2$ .

F, es la fuerza aplicada, N.

**Campo eléctrico**, potencialmente generable en magnitud, definido por la expresión (32) [1], [25].

$$E = g_{33}\sigma \quad (32)$$

En dónde,

$E$  es el campo eléctrico generable, V/m.

$g_{33}$ , es la constante de tensión piezoeléctrica del material, Vm/ N.

$\sigma$  es el nivel de stress ejercido al material,  $\frac{N}{m^2}$ .

Considerando las reacciones producidas en el piezoeléctrico bajo influencia de las fuerzas de acción, el voltaje producido por el material se describe por la expresión (33) [1].

$$V = ETh_{layer} \quad (33)$$

En dónde:

$V$  es el voltaje, V.

$E$  es el campo eléctrico generable, V/m.

$Th_{layer}$ , es el espesor o grosor del material, m.

En un sistema piezogenerador, sólo parte de la energía mecánica deforma el elemento, el resto se transforma en energía eléctrica, como se muestra en la expresión (34).

$$E_t = E_d + E_e \quad (34)$$

En dónde,

$E_t$ , es la energía total, J.

$E_d$ , es la energía mecánica empleada en deformar el elemento, J.

$E_e$ , es la energía eléctrica, J.

#### ***2.3.2.3 Conversión eléctrica – eléctrica.***

En los transductores piezoeléctricos que actúan como mini generadores, la conversión eléctrica- eléctrica implica el uso eficaz de energía en corriente continua, para aplicaciones de bajo consumo energético.

#### ***2.3.2.4 Conservación eléctrica – almacenamiento de energía para carga.***

La energía entregada por un sistema piezoeléctrico, es transitoria y discontinua, tanto en AC como en DC.

Con condensador externo  $C_{ext}$ , el voltaje externo de los mini generadores piezoeléctricos, se define por la ecuación (35) [1], [25].

$$V_{ext} = \frac{Q}{C_0 + C_{ext}} \quad (35)$$

En dónde,

$Q$  es la carga, C.

$C_0$  es la capacitancia interna del piezoeléctrico, F.

$V_{ext}$ , es el voltaje en el capacitor externo, V.

$C_{ext}$ , es la capacitancia del capacitor externo, F.

La energía almacenada en el capacitor externo, se define por la expresión (36) [1], [25].

$$E_{ext} = \frac{1}{2} C_{ext} \cdot V_{ext} \quad (36)$$

En dónde,

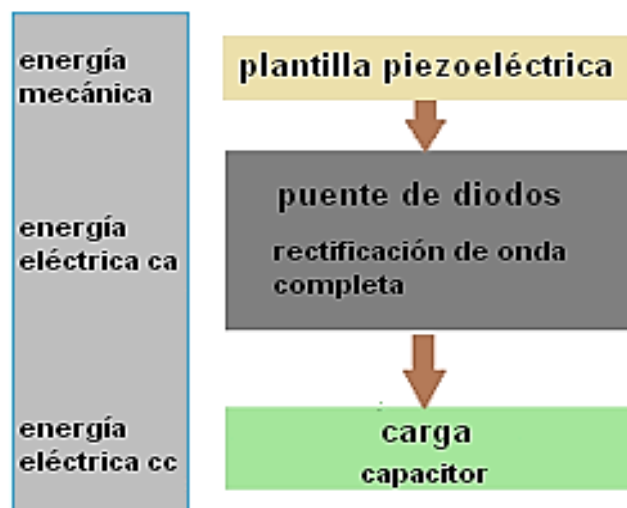
$E_{ext}$ , es la potencia externa, J.

$V_{ext}$ , es el voltaje en el capacitor externo, V.

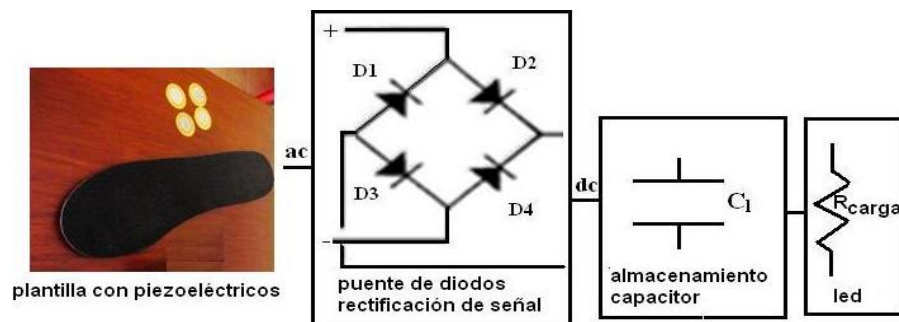
$C_{ext}$ , es la capacitancia del capacitor externo, F.

## 2.4 Prediseño de un sistema piezogenerador de harvesting de energía basado en transductores piezoeléctricos

La Fig. 2. 8 muestra las etapas de funcionamiento de un sistema de harvesting de energía, basado en la utilización de transductores piezoeléctricos. La Fig. 2. 9, presenta el diagrama de bloques propuesto para el sistema a implementar.



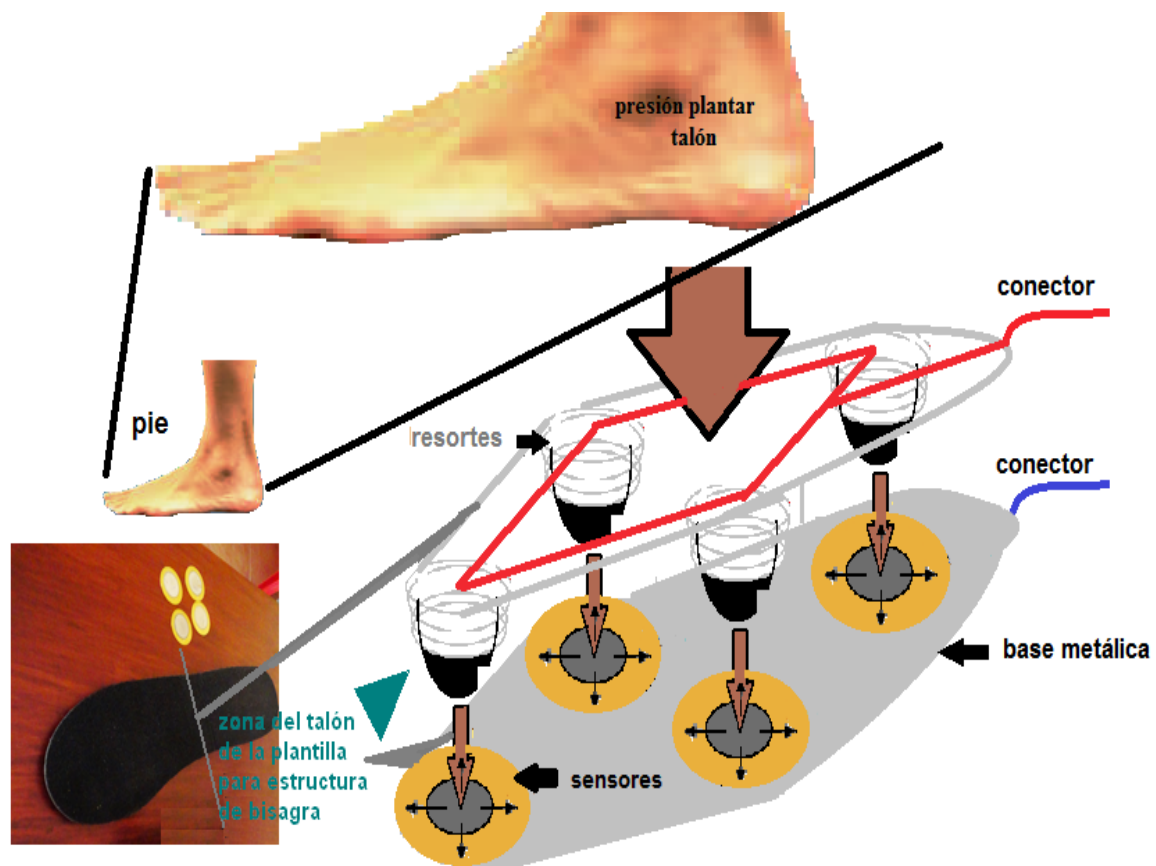
**Fig. 2. 8.** Etapas del harvesting de energía en un sistema basado en transductores piezoeléctricos. Fuente: Diseño de los autores.



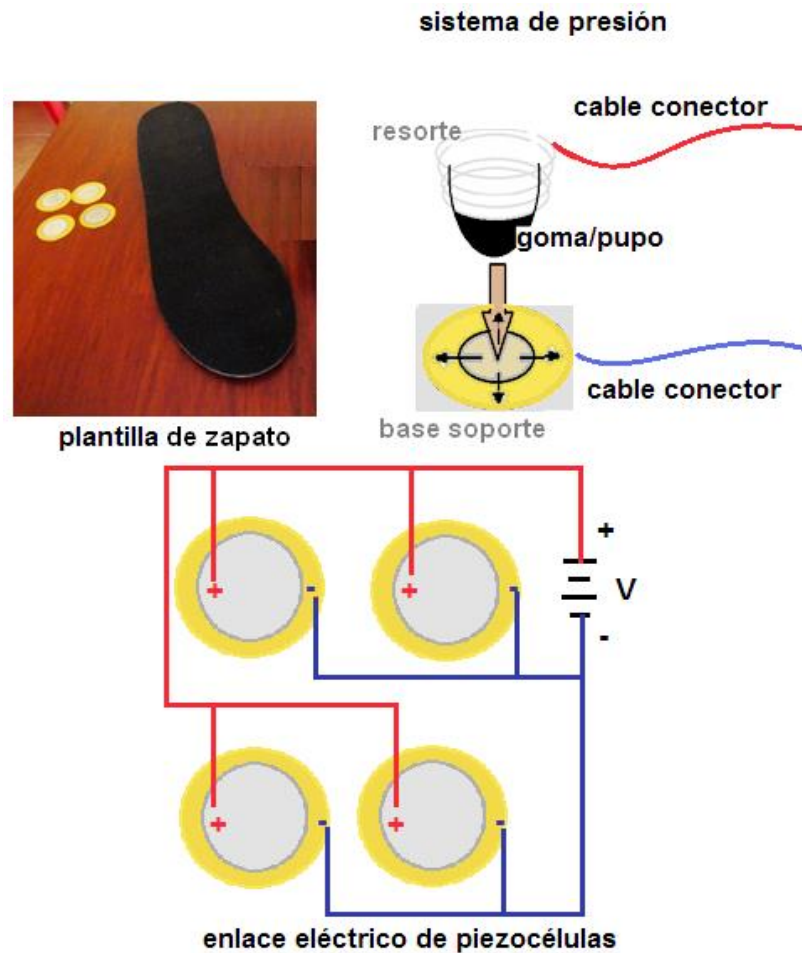
**Fig. 2. 9.** Diagrama de bloques funcionales para el sistema a implementar. Fuente: Diseño de los autores.

La revisión bibliográfica muestra que al caminar, el esfuerzo se concentra en el talón y la punta del pie, un poco más en el talón que en la punta [6], [9].

Desde esta perspectiva, en el marco de este proyecto, se propuso construir una plantilla piezoeléctrica, orientada a capturar la energía en el talón. La plantilla constará de 2 capas (ver Fig. 2. 10). En la capa superior, 4 gomas semirrígidas se distribuyen uniformemente para ejercer presión sobre 4 cerámicas piezoeléctricas, ubicadas en la capa inferior. El esquema eléctrico de conexión se muestra en la Fig. 2. 11.



**Fig. 2. 10.** Diseño de la plantilla piezoeléctrica a implementar en este proyecto Fuente: Diseño de los autores



**Fig. 2. 11.** Esquema de conexión eléctrica de la plantilla piezoeléctrica propuesta. Fuente: Diseño de los autores

Al caminar, se ejercerá presión directa sobre la plantilla, las gomas deformará los piezoeléctricos en dirección radial y perpendicular a la fuerza, obteniendo energía eléctrica de salida [28].

La energía de salida será de formato alterno, por lo cual se requerirá de un circuito rectificador [26], [29], [30].

Para el almacenamiento de la energía generada, se puede emplear dispositivos tales como condensadores, supercapacitores, o, baterías recargables [2], [19].



## **CAPITULO 3**

### **INGENIERÍA DE DETALLE DE UN SISTEMA DE PLANTILLAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA EN EL CALZADO**

### **3.1 Introducción**

Desde que en 1956, se logró fabricar cerámicas piezoeléctricas de la familia PZT, con gran sensibilidad y altas temperaturas de funcionamiento, se ha logrado su introducción en diversas aplicaciones como detectores de humo, transductores ultrasónicos, filtros, entre otras [27], [31], [32].

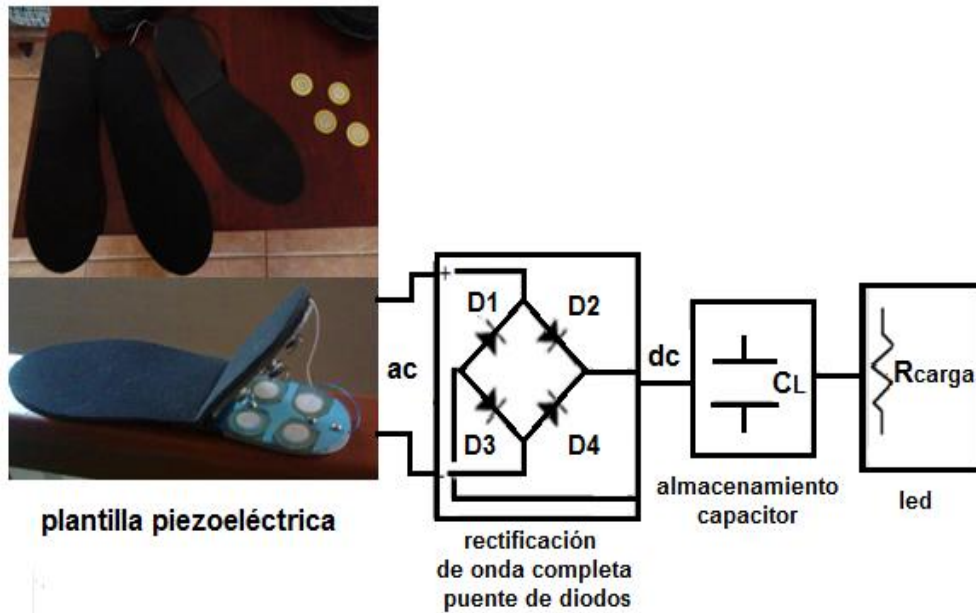
Dentro de las aplicaciones emergentes de harvesting de energía, por su replicabilidad especial interés presenta la utilización de cerámicas piezoeléctricas para capturar energía al caminar, a través del calzado. La captura de energía en la aplicación descrita, se fundamenta en una serie de consideraciones mecánicas y electrónicas.

En este capítulo, se describe y se explica la ingeniería de detalle de un sistema piezoeléctrico para la captura de energía en el calzado.

### **3.2 Ingeniería de detalle de un sistema piezoeléctrico para harvesting de energía en el calzado**

#### **3.2.1 Arquitectura propuesta para el sistema.**

En base a las etapas identificadas en harvesting de energía a través del efecto piezoeléctrico, y, descritas en la literatura [33], en el marco de este proyecto se propuso implementar un sistema piezoeléctrico para harvesting de energía en el calzado, estructurado de acuerdo a la arquitectura mostrada en la Fig. 3. 1.



**Fig. 3. 1.** Arquitectura propuesta para el sistema de harvesting de energía bajo efecto piezoeléctrico, a implementar.  
Fuente: Diseño de los autores.

El sistema piezoeléctrico propuesto, contendrá 3 bloques funcionales: piezoeléctrico, almacenamiento, e, interfaz de usuario.

### 3.2.2 Ingeniería de detalle del bloque piezoeléctrico.

#### 3.2.2.1 Sobre el elemento piezoeléctrico a utilizar.

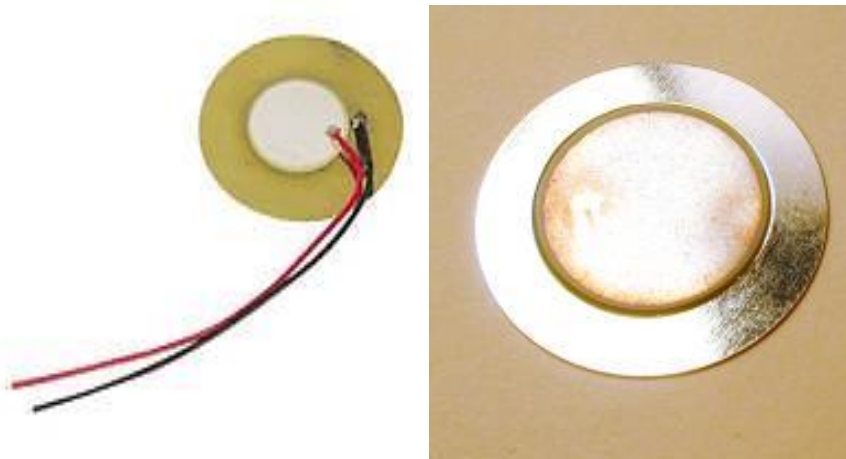
En cualquier sistema piezoeléctrico, el elemento piezoeléctrico utilizado es el componente principal. De su correcta selección y operación, depende la performance final del sistema.

Considerando la disponibilidad en el mercado local, se decidió utilizar un *zumbador* (unimorph disk, o, disco de capa piezoeléctrica uniforme), empleado habitualmente para

medir presión, aceleración, tensión o fuerza, y, muy común en varias aplicaciones de tweeter.

Un zumbador está formado por 2 chapas muy finas, de distintos metales, o, por una chapa de metal sobre la que se deposita una capa fina de cerámica o algún tipo de cristal.

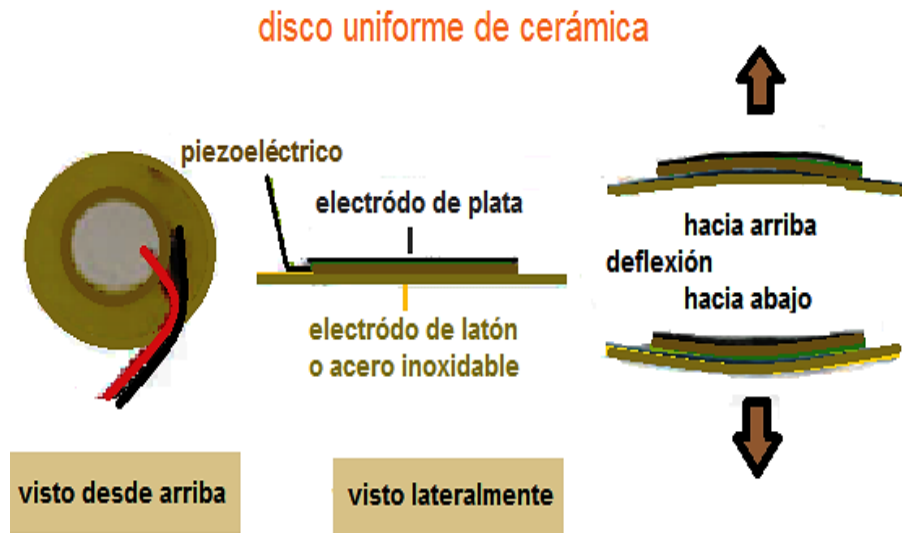
Cuando un zumbador se somete a presión, entre sus electrodos aparece una corriente eléctrica. Al ser alimentado con una corriente eléctrica, el componente vibra, razón por la cual se conoce como zumbador [34] (ver Fig. 3. 2).



**Fig. 3. 2.** Vista frontal de un zumbador piezoeléctrico.  
Fuente: tomado de [34], [35].

Un zumbador se representa con un circuito electrónico equivalentemente complejo, pero se puede aproximar a una carga capacitiva de entre 10 nF y 1 uF, variando esta. La capacitancia del zumbador depende de aspectos constructivos como área, espesor, constante a tensión, desplazamiento mecánico y eléctrico, entre otros [36].

Un zumbador típico presenta gran flexibilidad, doblándose hacia arriba y hacia abajo, dentro de un límite de deflexión (ver Fig. 3.3) [37].



**Fig. 3. 3.** Deflexión de un zumbador piezoeléctrico.  
Fuente: tomado de [37].

En el marco de este proyecto, se seleccionó un zumbador Cosson, correspondiente a un elemento tipo 7BB-27-4, cuyas características técnicas se muestran en las Tabla 1 y 2, [38], [39].

**Tabla. 3. 1.** Especificaciones técnicas del material piezoeléctrico.

<b>Porcentaje de voltaje (Vp-p)</b>	20
<b>Voltaje de operación (Vp-p)</b>	1~30
<b>Capacitancia (pf)</b>	16000±30%
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	-20~+60
<b>Temperatura de almacenaje (°C)</b>	-20~+70
<b>Peso (g)</b>	0.5

Fuente: tomado de [38].

**Tabla. 3. 2.** Especificaciones técnicas de los materiales piezoeléctricos.

<b>Tipo</b>	7BB-27-4	7BB-27-4L0
<b>Frecuencia resonancia de</b>	4.6-0.5KHz	4.6-0.5KHz
<b>Impedancia resonancia de</b>	200max	300max
<b>D1 (mm)</b>	27	27
<b>D2 placa (mm)</b>	19.7	19.7
<b>D3 (mm)</b>	18.2	18.2
<b>Espesor</b>	0.54	0.54
<b>Grosor placa</b>	0.3	0.3
<b>Tipo material</b>	Latón	Latón

Fuente: tomada de [39].

### ***3.2.2.2 Sobre la plantilla piezoeléctrico a emplear.***

Las piezocélulas (zumbadores) se accionan mecánicamente, a través de las denominadas plantillas piezoeléctricas.

Para este proyecto, se decidió construir y evaluar el desempeño de 3 diferentes prototipos de plantillas piezoeléctricas, diferenciadas por el diseño de la base.

#### ***3.2.2.2.1 Primer prototipo de plantilla piezoeléctrica.***

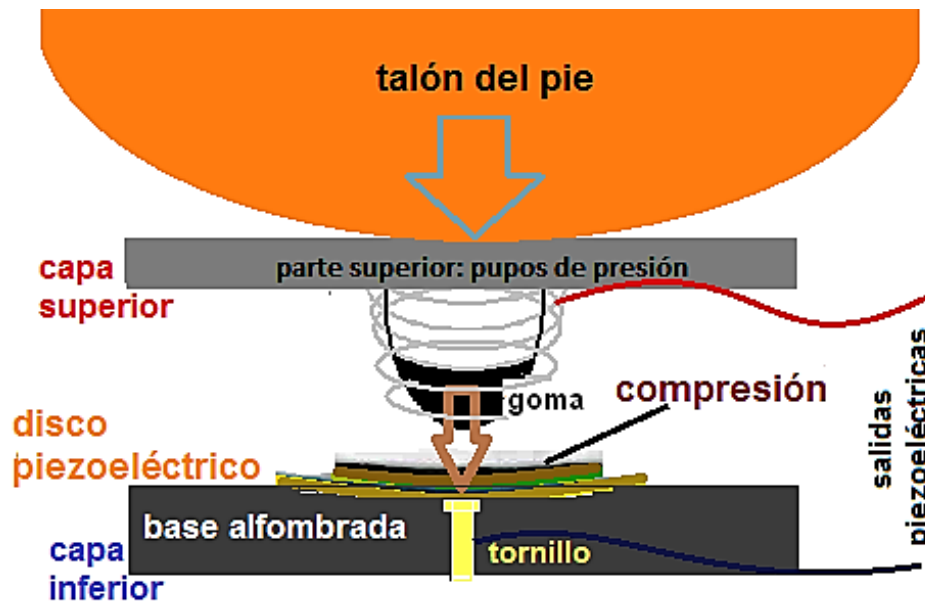
El primer modelo de plantilla piezoeléctrica, posee 2 capas en la zona del talón, unidas en bisagra en un extremo, y, libres por el otro (ver Fig. 3. 4).



**Fig. 3. 4.** Implementación del prototipo I.  
Fuente: Fotografía de los autores.

La capa inferior está formada por una base de plástico, recubierta con material de espuma de goma y tela, sobre la que se colocan y sujetan 4 piezocélulas. 4 tornillos ubicados bajo las piezocélulas sirven como electrodos, y, se cablean en paralelo entre sí, para conformar una primera salida piezoeléctrica (ver Fig. 3. 5).

En la capa superior, también de plástico, sobresalen 4 gomas, distribuidas uniformemente, que al caminar ejercen presión sobre las piezocélulas. Cada goma se complementa con un resorte que actúa como electrodo. Los resortes se unen en paralelo, y, conforman una segunda salida piezoeléctrica (ver Fig. 3. 5).

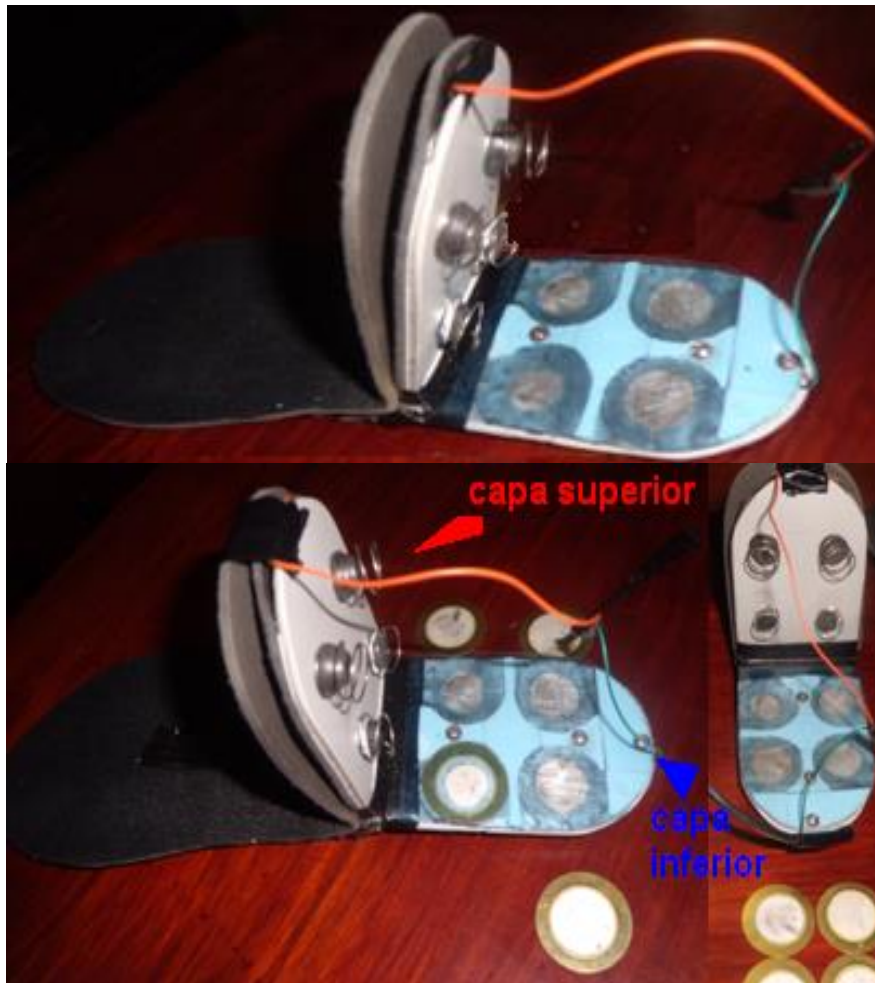


**Fig. 3. 5.** Esquema de funcionamiento del prototipo I.  
Fuente: Diseño de los autores.

### 3.2.2.2 Segundo prototipo de plantilla piezoeléctrica.

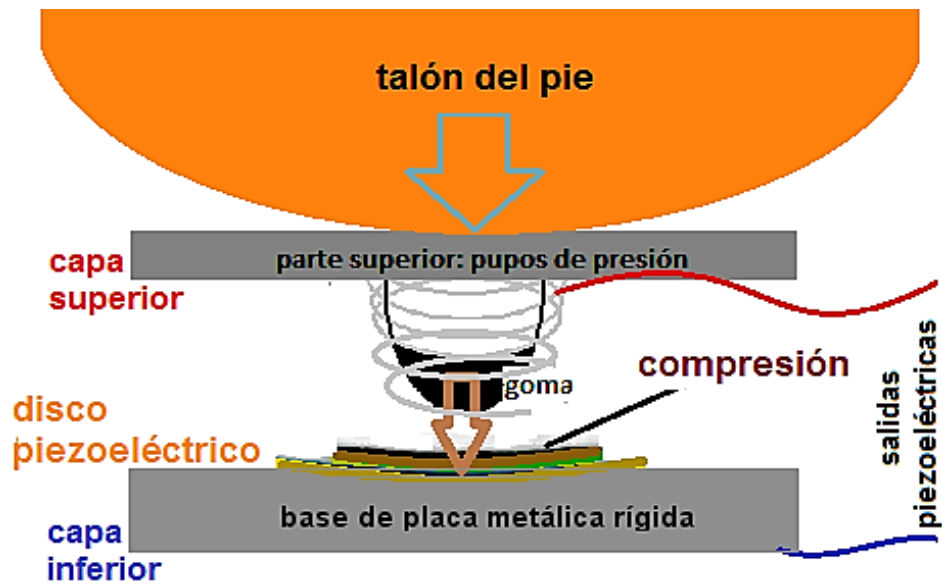
El segundo prototipo de plantilla, posee una estructura similar al del primero, pero tiene una capa inferior diferente (ver Fig. 3. 6).





**Fig. 3. 6.** Implementación del prototipo II.  
Fuente: Fotografía de los autores.

La capa inferior, es una placa base de metal tool, material de buena capacidad de conducción eléctrica, plana y rígida, sobre la cual se coloca una cubierta plástica semitransparente. Sobre la placa, se sujeta 4 piezocélulas que interactúan con la placa metálica, que sirve de electrodo común (ver Fig. 3. 7).



**Fig. 3. 7.** Esquema de funcionamiento del prototipo II.  
Fuente: Diseño de los autores.

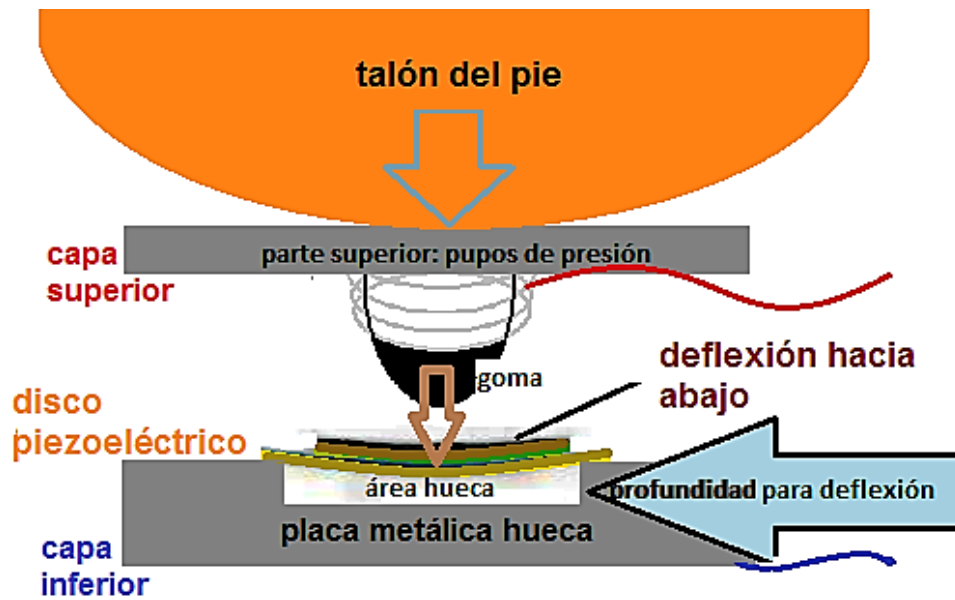
### 3.2.2.2.3 Tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica.

El tercer prototipo de plantilla, posee una capa inferior semejante a la del segundo prototipo, con la salvedad de que la base metálica bajo las células esta perforada (ver Fig. 3. 8).



**Fig. 3. 8.** Implementación del prototipo III.  
Fuente: Fotografía de los autores.

La perforación de la base metálica bajo las piezocélulas, permite la deflexión por profundidad al límite máximo (ver Fig. 3. 9).

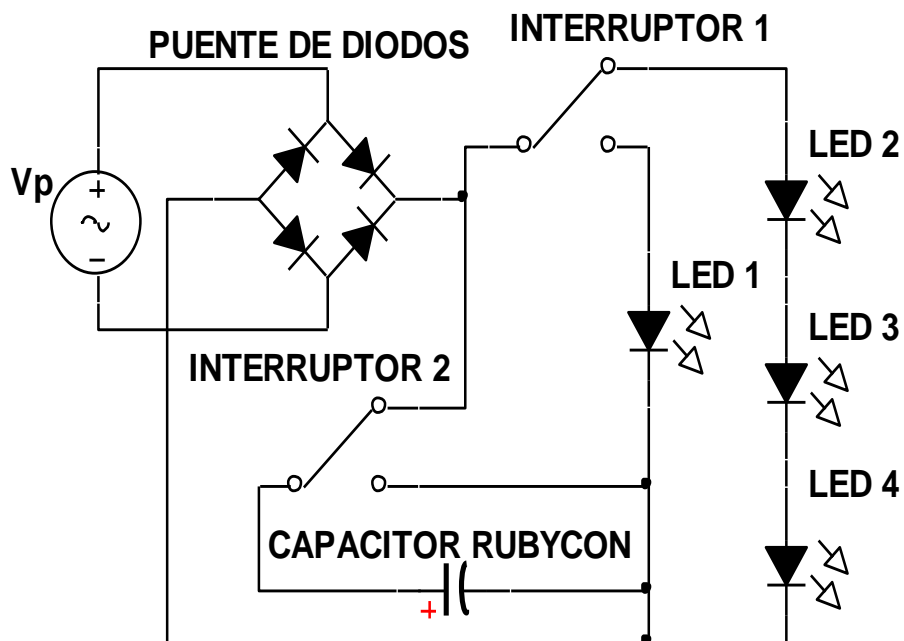


**Fig. 3. 9.** Esquema de funcionamiento del prototipo III.  
Fuente: Diseño de los autores.

### 3.2.3 Ingeniería de detalle del bloque de almacenamiento o storage.

A través de los tres prototipos de plantillas piezoeléctricas, se logra la conversión inicial mecánico – eléctrica.

La conversión eléctrica – eléctrica para harvesting, y, el storage de energía, se realizará a través del circuito mostrado en la Fig. 3. 10.



**Fig. 3. 10.** Diseño electrónico del bloque de almacenamiento y storage de energía.  
Fuente: Diseño de los autores.

El bloque propuesto, tiene una entrada de señales aleatorias, en AC, provenientes de la plantilla piezoeléctrica. ( $V_p$ ). Un puente de diodos a 2A, regula y convierte las señales piezoeléctricas a DC. Un capacitor de rápida carga y descarga, tipo RUBYCON, de 180uF 330V, realiza el storage de energía.

Para alimentar a la carga, en el bloque se contempla la instalación de un socalo de 8 pines, que permite la conexión de LEDs y un multímetro. El circuito se complementa con 2 interruptores, que conmutan el flujo de energía.

La implementación del circuito en baquelita, se muestra en la Fig. 3. 11. La implementación cabe dentro de un adaptador de celular de 7x4x 2cm (ver Fig. 3. 12).



**Fig. 3. 11.** Circuito implementado en baquelita.  
Fuente: Diseño de los autores.



**Fig. 3. 12.** Caja de adaptador que contiene circuito, rectificador de señal, y, capacitor de carga.  
Fuente: Fotografía de los autores.

### 3.2.4 Sistema piezoeléctrico completo para harvesting de energía, interfaz para el usuario.

El sistema total, se concibe como un todo integrado que se ubica en el calzado, sin alterar mayormente la estética (ver Fig. 3. 13).



**Fig. 3. 13.** Integración de las plantillas piezoeléctricas, y, circuito de harvesting de energía.

Fuente: Fotografía de los autores.

## **CAPITULO 4**

### **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE 3 PROTOTIPOS DE PLANTILLAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA EN EL CALZADO**



## **4.1 Introducción**

Desde la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE de la UTPL, se han impulsado diversas iniciativas de desarrollo de aplicaciones que permitan analizar a profundidad el proceso de harvesting de energía a través del efecto piezoeléctrico.

En el marco de una de estas iniciativas, se diseñó e implementó 3 prototipos de plantillas piezoeléctricas para la captura de energía en el calzado, cuya arquitectura y principio de funcionamiento se explicó en trabajos anteriores.

En este capítulo, se analiza el desempeño de las plantillas piezoeléctricas diseñadas, en base a la aproximación matemática de la capacidad de generación de energía de las plantillas piezoeléctricas a partir de la descripción del proceso de piezogeneración disponible en la bibliografía [1], [5], [24], [40], [41]; y, con el complemento de la discusión de los resultados obtenidos en pruebas de campo.

## **4.2 Evaluación del desempeño de las plantillas piezoeléctricas propuestas**

### **4.2.1 Aproximación matemática de la potencialidad de generación.**

En la literatura se describe como, en base a los resultados obtenidos en pruebas prácticas, fue posible obtener una expresión para el cálculo del voltaje real o voltaje piezoeléctrico de salida (ver expresión 37) [1], [5], [24], [40], [41], [42]:

$$V = -(g_{33} * \sigma * Th_{layer}) \quad (37)$$

En dónde,

V es el voltaje, V.

$g_{33}$  es la constante de tensión piezoeléctrica del material, Vm/ N.

$\sigma$  es el nivel de stress ejercido al material, N/m<sup>2</sup>.

$Th_{layer}$ , es el espesor del material, m.

Por otra parte, una persona al caminar ejerce sobre el piso una fuerza equivalente a su peso, esta fuerza, definida por la expresión (38).

$$F = mg \quad (38)$$

En dónde,

F es la fuerza aplicada sobre el material, N.

m es la masa (peso de la persona), kg.

g es el valor de gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>).

Un individuo de 60 kg de masa, ejercerá entonces una fuerza de 588 N sobre el piso, o sobre el material piezoeléctrico dispuesto sobre el piso.

En la etapa inicial de la piezogeneración (**etapa mecánica**), el nivel de stress del material piezoeléctrico, se define a través de ecuación (39):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (39)$$

En dónde,

$\sigma$ , es el nivel de stress del material, N/m<sup>2</sup>.

F es la fuerza aplicada sobre el material, N.

A es el área expuesta del material, m<sup>2</sup>.

Entonces, la fuerza ejercida por una persona de 60 kg de masa, sobre un arreglo de 4 piezocélulas, en un área de 7mm de diámetro, provocará un stress o esfuerzo en el material, del orden de los 3819718,634 N/m<sup>2</sup>.

En la segunda etapa de la piezogeneración (**etapa mecánico-eléctrica**), se produce la conversión del esfuerzo mecánico en energía, a través de la creación de un campo eléctrico definido por la expresión (40) [1], [24], [41], [42]:

$$E = g_{33}\sigma \quad (40)$$

En dónde,

E, es el campo eléctrico generable, V/m.

$g_{33}$ , es la constante de tensión piezoeléctrica del material Vm/ N.

$\sigma$ , es el nivel de stress del material, N/m<sup>2</sup>.

La Tabla 4. 1, muestra las características técnicas más importantes de los cerámicos piezoeléctricos de mayor difusión en el mercado [40], [41], [42].

**Tabla. 4. 1.** Materiales comerciales y sus respectivas constantes.

Material Propiedad	PZT- 4	PZT- 5A	PZT- 5J	PZT- 5H
$k_p$	0,60	0,61	0,60	0,63
$k_{33}$	0,68	0,70	0,71	0,73
$d_{33}(10^{-12}C/N)$	300	400	460	550
$d_{31}(10^{-12}C/N)$	-11,5	-170	-210	-265
$g_{33}(10^{-3}C/N)$	26	25	22	19
$g_{31}(10^{-3}C/N)$	-11	-11	-9	-9
$K_3^T$ (señal baja)	1250	1750	2450	3100
C. dieléctrica relativa				
Factor de disipación $\tan\delta$ (campo bajo)	0,004	0,020	0,020	0,020
Densidad Kg/m <sup>3</sup>	7600	7650	7500	7500
Temp. Curie (°C)	325	360	260	190
Factor de calidad $Q_m$	500	75	70	65
$s^E_{11}(10^{-12}m^2/N)$	12	19	23	21
$s^E_{33}(10^{-12}m^2/N)$	16	16	16	15
$s^D_{11}(10^{-12}m^2/N)$		14,6-13,0-13,9		
$s^D_{33}(10^{-12}m^2/N)$		9,6-7,7-8,8		
$N_p$ (Hz-m) modo planar	2200	1950	2000	1950
$N_t$ (Hz-m) modo espesor	1905	1800	1950	2000

Fuente: Tomado de [40], [41], [42].

Considerando la información proporcionada por la Tabla. 4. 1, el campo eléctrico generable en cerámicos tipo PZT-4, alcanza los 99312, 684 V/m. Para cerámicos tipo PZT-5, el campo será del orden de los 72574, 654 V/m.

Entonces el voltaje de salida del material piezoeléctrico se relaciona con el campo eléctrico generable, a partir de la expresión (41):

$$V = ETh_{\text{layer}} \quad (41)$$

En dónde,

V, es el voltaje de salida, V.

E, es el campo eléctrico generable, V/m.

$T_{\text{layer}}$ , es el espesor del material, m.

Entonces, para cerámicos tipo PZT-4, el voltaje de salida estará en el orden de 23,835 V, mientras que para materiales tipo PZT-5, el voltaje esperado será de 17,418 V.

Los valores de voltaje de salida calculados analíticamente, son semejantes a los declarados en la ficha técnica del fabricante de los zumbadores, que hace referencia a 20 V [43].

Adicionalmente al voltaje de salida, en el proceso de piezogeneración también se obtiene una carga básica, cuyo valor se calcula a través de la expresión (42) [1], [5], [40], [41], [42]:

$$Q = Fd_{33} \quad (42)$$

En dónde,

Q, es la carga producida, C.

F, es la fuerza aplicada, N.

$d_{33}$ , es la polarización inducida por unidad de esfuerzo aplicado en la dirección 3, C/N.

Para cerámicos PZT-5, la carga básica será del orden de los 323,4 nC.

Al representar la piezogeneración con un circuito equivalente [1] (ver Fig. 4. 1), para el circuito equivalente abierto, el voltaje de salida se relaciona con la carga básica, a través de la ecuación (43):

$$V_{\text{ext}} = \frac{Q}{C_t} - V_D \quad (43)$$

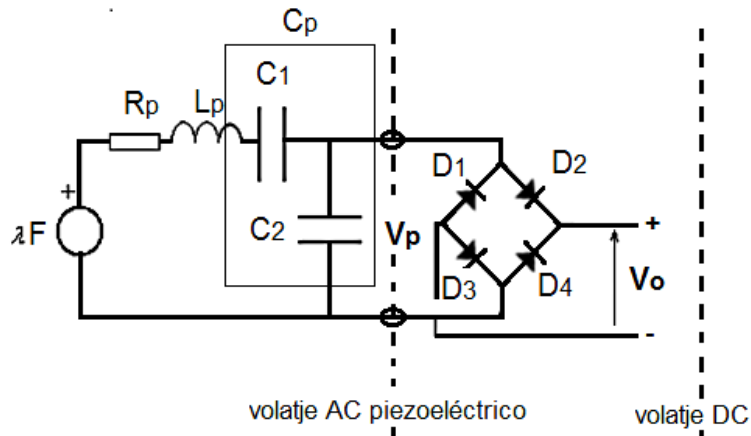
En dónde,

Q es la carga, C.

$V_{\text{ext}}$ , es el voltaje externo, V.

$C_t$ , es la capacitancia total, capacitancia interna del piezoelectrico ( $C_o$ ), y capacitancia externa ( $C_{\text{ext}}$ ), F.

$V_D$ , es el voltaje en el diodo del circuito equivalente, V.



**Fig. 4. 1.** Circuito equivalente del proceso de piezogeneración.  
Fuente: Diseño de los autores, [16], [19].

Sin capacitor externo, y, considerando una capacitancia nula en los cables, el voltaje externo de los materiales tipo PZT-5, se calcula en 20,7 V.

En la tercera etapa de la piezogeneración (**etapa eléctrica – eléctrica**), se produce la conversión de energía del formato AC a DC [26]. Entonces, para una rectificación de onda completa, el voltaje rectificado se aproxima por la expresión (44):

$$V_{dc} = 0.636 * V_m \quad (44)$$

En dónde:

$V_{dc}$ , es el voltaje continuo de onda completa, V.

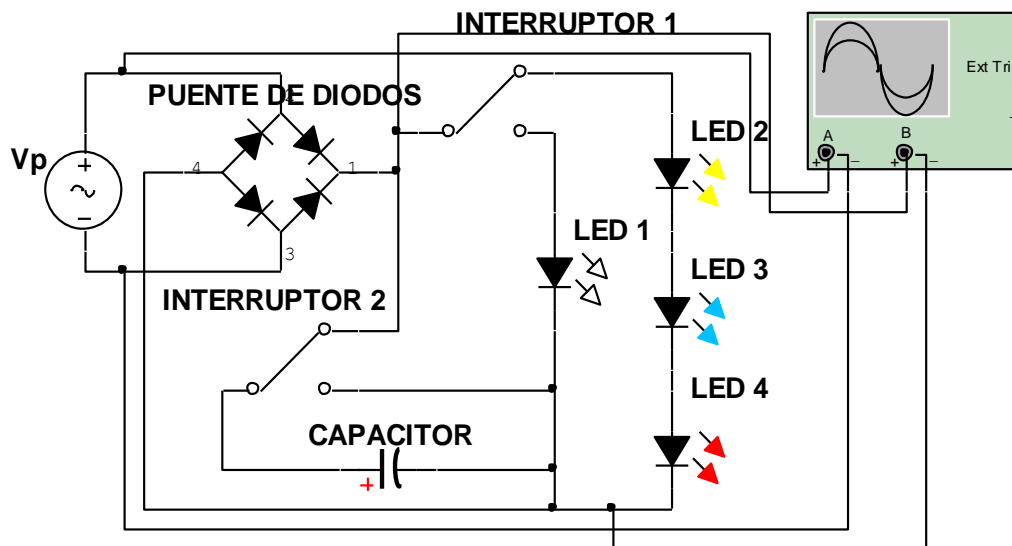
$V_m$ , es el Voltaje rms, V.

Para el material PZT-5, el voltaje rectificado estaría en el orden de 13,2V.

#### 4.2.2 Preparativos para pruebas de campo.

Previo a la realización de pruebas de campo, se decidió evaluar el funcionamiento del circuito eléctrico de las plantillas piezoeléctricas en una simulación, utilizando los recursos de la aplicación Multisim.

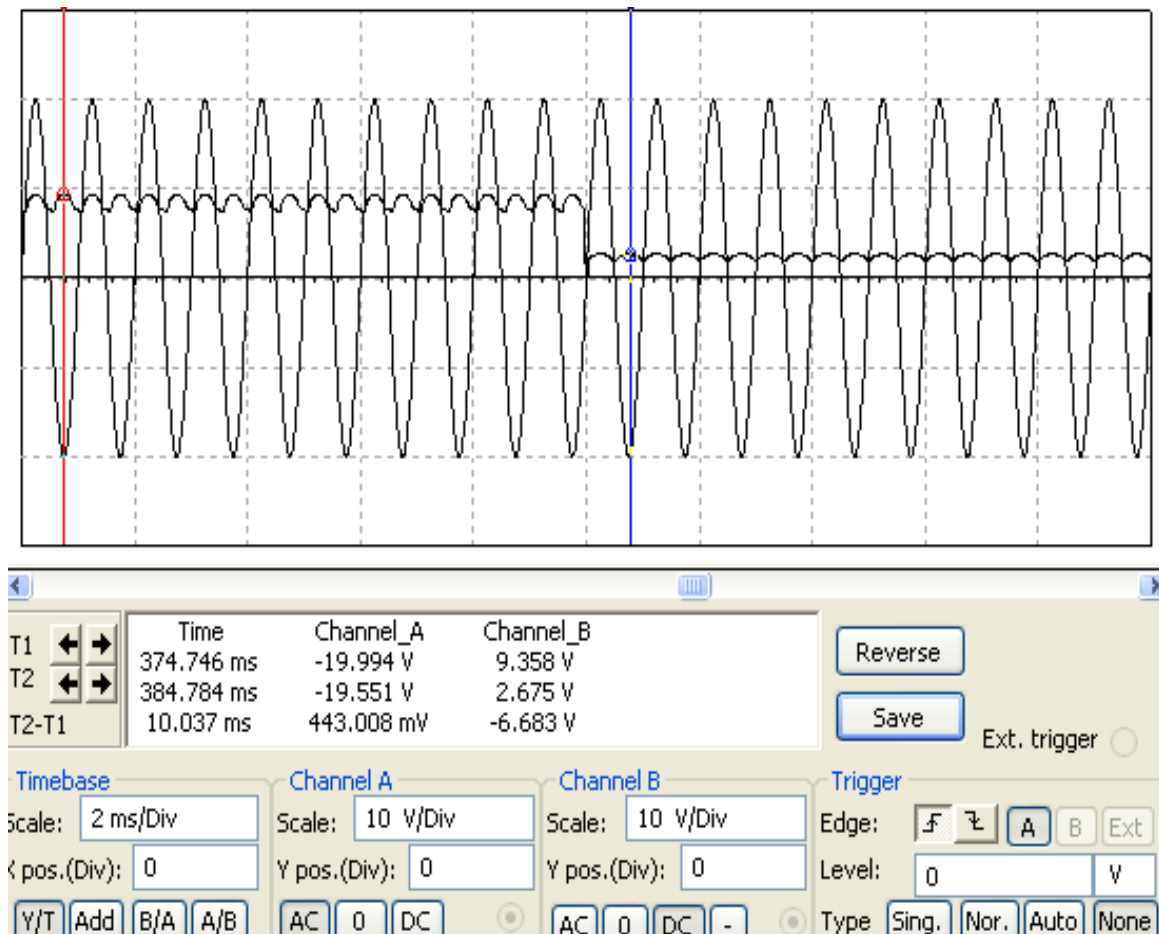
La Fig. 4. 2 muestra el circuito simulado, empleando una entrada variable de 20 V ( $V_p$ ). La Fig. 4. 3, muestra los resultados obtenidos al alimentar los 2 arreglos de la carga (1 LED, y, 3 LEDs): la señal piezoeléctrica de entrada corresponde a una señal sinusoidal AC, con valores pico de 20 V; operando con la carga de 3 LEDs, el voltaje rectificado alcanza valores de 9,35 V; mientras que, para un solo LED de carga, el voltaje rectificado es del orden de los 2,68 V, valores esperados por la baja impedancia de los LEDs.



**Fig. 4. 2.** Circuito electrónico de las plantillas piezoeléctricas simulado en Multisim.

Fuente: Diseño de los autores.





**Fig. 4. 3.** Resultados obtenidos en la simulación del circuito electrónico de las plantillas piezoeléctricas.

Fuente: Diseño de los autores.

### 4.2.3 Pruebas de campo.

Todas las plantillas piezoeléctricas comparten el mismo circuito electrónico, y, se diferencia en la forma en que se excitan las piezocélulas. El esquema electrónico se montó de acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 4. 2, utilizando como carga LEDs de 2,1 a 3,6 V, a 20mA [44]. Como capacitor se empleó un elemento RUBYCON, de rápida respuesta a carga y descarga, de 180uF a 330V [45], reutilizado de un photo flash.

El circuito ha sido diseñado de tal forma que, al caminar se excite el material piezoeléctrico, se genere energía, y se almacene en el capacitor. La carga se activa, cuando en los electrodos del capacitor se alcance el voltaje mínimo requerido por los arreglos de LED.

Las plantillas piezoeléctricas se sometieron a 3 pruebas. En la primera, se verificó la forma de la señal entregada por la plantilla. En la segunda, se analizó el comportamiento de cada plantilla en la alimentación de un único LED, mientras que en la tercera se revisó el desempeño de la plantilla de mejor performance en la primera prueba, al proveer de energía al arreglo de 3 LEDs.

#### ***4.2.3.1 Resultados obtenidos en la primera prueba.***

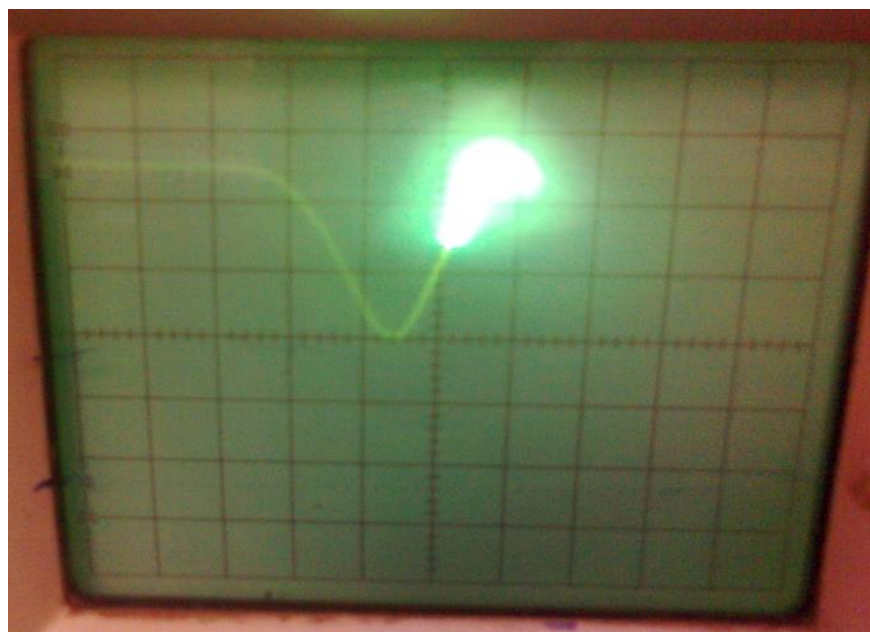
Para determinar la forma de la señal entregada por la plantilla, y, aproximar la potencia generada, por facilidad, se utilizó la segunda plantilla piezoeléctrica.

En un ***primer experimento***, la plantilla se excitó manualmente, mientras el circuito alimentaba una carga de un solo LED. En un osciloscopio, con una escala de 1 ms por división en el eje (x), y, una de 1 V por división en el eje (y), se observó la señal mostrada en la Fig. 4. 4. La señal alcanzó un valor de 2, 3 V aproximadamente.



**Fig. 4. 4.** Señal de salida de la segunda plantilla piezoeléctrica, ante una excitación manual constante, y, una carga de un solo LED.  
Fuente: Fotografía de los autores.

En un **segundo experimento**, la plantilla se excitó por un caminante. Para una escala de 20ms por división (eje x), y, 1V por división (eje y), se obtuvo el choque del talón que provoca un pulso inverso en la señal.



**Fig. 4. 5.** Señal de salida de la segunda plantilla piezoeléctrica, ante una excitación por un caminante, y, una carga de un solo LED.  
Fuente: Fotografía de los autores.

En un **tercer experimento**, se intentó aproximar la potencia generada por la plantilla piezoeléctrica. Con el capacitor y la carga conectados al circuito. En base a la observación, se registró el valor inicial y final del voltaje proporcionado a la carga, donde la intensidad luminosa del LED se mantiene invariante, y, el amperaje que circula por la rama. La Tabla. 4. 2, muestra los resultados obtenidos al alimentar un solo LED.

**Tabla. 4. 2.** Potencia generada en la segunda plantilla piezoeléctrica, durante la alimentación de un solo LED de carga.

Prueba	Peso del caminante, Kg	Valores iniciales y finales de voltaje en la carga, V	Corriente en la rama, uA	Potencia generada, uW
1	46	2.52-2.49	28.0	70.140
2	47		25.2	63.126
3	48		20.1	50.350
4	57		26.7	66.884
5	58		26.4	66.132

Fuente: Elaboración de los autores.

#### **4.2.3.2 Resultados obtenidos en la segunda prueba.**

La Fig. 4. 6 muestra una panorámica general del equipamiento empleado para evaluar el desempeño de cada una de las 3 plantillas piezoeléctricas diseñadas, al alimentar un único LED de carga. Para diferentes pesos del caminante, mediante un cronómetro se determinó el tiempo  $t$  requerido para que el condensador alcance el voltaje mínimo requerido por la carga, registrando el número de pasos efectuados para alcanzar este objetivo, y, midiendo el voltaje entregado a la carga.



**Fig. 4. 6.** Vista general del equipamiento utilizado para evaluar el desempeño de las plantillas piezoeléctricas alimentando un único LED. Fuente: Fotografía de los autores.

La Tabla. 4. 3 muestra los resultados obtenidos al experimentar con la primera plantilla piezoeléctrica, en la que las piezocélulas se excitan sobre una superficie semiflexible. Durante la ejecución de las pruebas, se detectó problemas con el diseño mecánico del segmento de excitación, razón por la cual la evaluación pudo ser completada sólo para 2 caminantes.

**Tabla. 4. 3.** Desempeño de la primera plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga.

Prueba	Peso del caminante, Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
1	46	-	-	-
2	47	-	-	-
3	48	35,02	2,49	30
4	57	-	-	-
5	58	33,02	2,49	26

Fuente: Elaboración de los autores.

La Tabla. 4. 4 muestra los resultados obtenidos para la segunda plantilla. El uso de una base metálica rígida y de gran conductividad, sobre la que se excitan las células piezoeléctricas, redujo el tiempo necesario para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga.

Al experimentar con el tercer prototipo, que incluye una base metálica perforada para facilitar la deflexión de las piezocélulas, se registró la destrucción mecánica de los elementos, para perforaciones de más de 1 mm de profundidad (ver Fig. 4. 7). El problema presentado se solucionó al reducir la profundidad de las perforaciones a menos de 1 mm. La Tabla. 4. 5 muestra los resultados obtenidos entonces. Una mayor deflexión de las piezocélulas, permite alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en un intervalo de tiempo más corto, aunque siempre existirá la limitante de la deflexión máxima soportada por las piezocélulas.

**Tabla. 4. 4.** Desempeño de la segunda plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga.

Prueba	Peso del caminante, Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
1	46	30.05	2.50	25
2	47	29.16	2.51	23
3	48	27.57	2.50	22
4	57	24.68	2.51	20
5	58	23.93	2.49	19

Fuente: Elaboración de los autores.



**Fig. 4. 7.** Destrucción mecánica de las piezocélulas al experimentar con el tercer prototipo con perforaciones de más de 1mm de profundidad.

Fuente: Fotografía de los autores

**Tabla. 4. 5.** Desempeño de la tercera plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga.

Prueba	Peso del caminante , Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
1	46	15.80	2.50	12
2	47	15.30	2.49	11
3	48	15.03	2.51	11
4	57	14.25	2.51	10
5	58	13.49	2.49	10

Fuente: Elaboración de los autores.

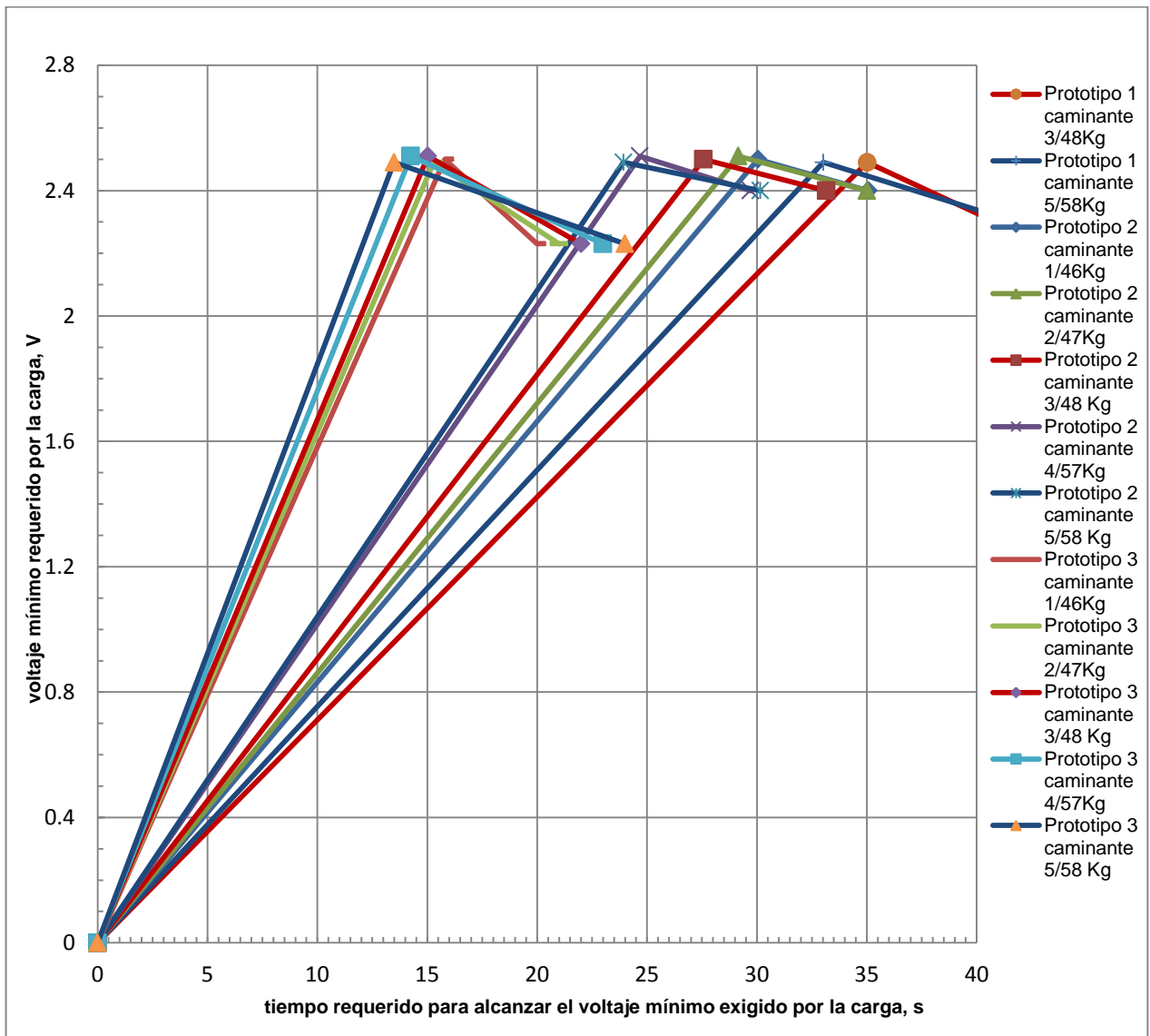
La Tabla. 4. 6 resume los resultados para las 3 plantillas investigadas. La mejor performance se obtuvo para la plantilla que emplea material perforado para la deflexión de las piezocélulas. La Fig. 4. 8 muestra el comportamiento de cada plantilla para diversos pesos del caminante.

**Tabla. 4. 6.** Desempeño de las plantillas piezoeléctricas al alimentar un único LED de carga.

#	Peso del caminante ante	Voltaje mínimo requerido por la carga, v	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en el primer prototipo, s	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en el segundo prototipo, s	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en el tercer prototipo, s
1	46	2.49- 2.51		30.05	15.80
2	47			29.16	15.30
3	48		35,02	27.57	15.03
4	57		-	24.68	14.25
5	58		33.02	23.93	13.49

Fuente: Elaboración de los autores.





**Fig. 4. 8.** Comportamiento de las plantillas para diversos pesos del caminante.  
Fuente: Gráfica/tabla Excel elaborada por los autores.

#### 4.2.3.3 Resultados obtenidos en la tercera prueba.

Los resultados obtenidos en la segunda prueba, permitieron seleccionar como prototipo óptimo al que, utiliza material perforado para la deflexión de las piezocélulas. Este prototipo se sometió entonces a la prueba, en la que se alimentó una carga conformada

por 3 LEDs conectados en serie. La metodología del experimento fue la misma empleada en la primera prueba (ver Fig. 4. 9). La Tabla. 4. 7, muestra los resultados obtenidos.



**Fig. 4. 9.** Vista general del equipamiento utilizado para evaluar el desempeño del tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica, alimentando una carga de 3 LEDs conectados en serie.  
Fuente: Fotografía de los autores.

**Tabla. 4. 7.** Desempeño del tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica al alimentar una carga de 3 LEDs conectados en serie.

Prueba	Peso del caminante, Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
4	57	44.28	6.52-6.55	32

Fuente: Elaboración de los autores.

Según el tipo de plantilla, caminando entre 30 a 10 pasos respectivamente para cada plantilla, se logra una potencia mínima, de 60 a 70uW, sin considerar los tiempos de llegada al voltaje mínimo de encendido del LED.

## CONCLUSIONES

- En 1995, los laboratorios de investigación sobre cosecha de energía residual del MIT, llegaron a la conclusión de que del choque del talón era factible obtener energía.
- Actualmente, se puede encontrar en el mercado diferentes aplicaciones que utilizan el efecto piezoeléctrico para capturar energía a través del calzado, y, que proveen de energía a cargas de bajo consumo como baterías, lámparas, y, otras.
- En cada una de las fases de un paso completo, las fuerzas actúan de forma equilibrada, distribuida, y, proporcionada.
- Con la intención de concentrar las fuerzas de acción y reacción, facilitando la contracción y la elongación del material piezoeléctrico ubicado en el calzado, se utilizan plantillas piezoeléctricas.
- La revisión bibliográfica muestra que, los cerámicos y los polímeros son los piezoeléctricos preferidos al momento de diseñar plantillas para potenciar el harvesting de micro energía.
- Los resultados obtenidos en pruebas efectuadas con plantillas PVDF y PZT, en condiciones similares, muestran un mejor desempeño de la plantilla PZT.
- El uso de diferente tipo de calzado, modifica el sistema de fuerzas de reacción en contraposición a la marcha humana. La mejor performance en un piezoeléctrico se logra en calzado de horma flexible, por cuanto una mayor deformación, y, una pronta recuperación de la forma original, facilitan la generación de un mayor tren de pulsos de energía.
- Se describe a la piezoelectricidad como la propiedad de algunos materiales, de polarizarse eléctricamente, ante una fuerza deformativa externa.
- Durante la deformación - generación piezoeléctrica, no toda la energía mecánica se convierte en eléctrica. La regresión del material a su estado natural, se comporta como energía elástica.
- La revisión bibliográfica muestra que, los materiales piezoeléctricos fabricados, pueden polarizarse en 3 direcciones análogas posibles (x, y, z).
- De acuerdo a la bibliografía, existen 6 tipos de materiales piezoeléctricos.

- En un material piezoeléctrico, la compresión o tensión aplicada, hace que la distancia entre los dipolos de la estructura piezoeléctrica cambie, creando un campo eléctrico, que resulta, en carga en la superficie. Este proceso físico, conocido como efecto piezoeléctrico, determina la conversión energética en materiales PZT o PVDF.
- El comportamiento electromecánico de todo material piezoeléctrico, presenta modos de vibración y polarización, determinados por la geometría del mismo elemento y por sus propiedades mecánico elástica.
- Los transductores piezoeléctricos son elementos de alta eficiencia, debido a las mínimas pérdidas por fricción o por temperatura.
- A partir de una entrada mecánica, los transductores piezoeléctricos, convierten la presión sana en voltaje eléctrico.
- En el harvesting de energía en transductores piezoeléctricos PZT, se identifica 4 etapas: mecánica, mecánica-eléctrica, conversión eléctrica-eléctrica, y, conservación eléctrica a carga.
- La revisión bibliográfica muestra que al caminar, el esfuerzo se concentra en el talón y la punta del pie, siendo un poco más en el talón que en la punta.
- Desde que en 1956, se logró fabricar cerámicas piezoeléctricas de la familia PZT, con gran sensibilidad y altas temperaturas de funcionamiento, se ha logrado su introducción en diversas aplicaciones como detectores de humo, transductores ultrasónicos, filtros, entre otras.
- Por su replicabilidad, especial interés presenta la utilización de cerámicas piezoeléctricas para capturar energía al caminar, a través del calzado, fundamentándose en una serie de consideraciones mecánicas y electrónicas.
- El sistema piezoeléctrico propuesto para harvesting de energía a través del calzado, contiene 3 bloques funcionales: el piezoeléctrico, el de almacenamiento, y, el de interfaz de usuario.
- En cualquier sistema piezoeléctrico, el elemento piezoeléctrico utilizado es el componente principal. Considerando su disponibilidad en el mercado local, el elemento utilizado en este proyecto es un zumbador (unimorph disk, o, disco de capa piezoeléctrica uniforme).

- Para este proyecto, se decidió, diseñar y probar 3 diferentes prototipos de plantillas piezoeléctricas, diferenciadas por las características técnicas de la base.
- Las pruebas preliminares, mostraron que el tercer prototipo presenta los mejores resultados de desempeño.
- La conversión eléctrica – eléctrica, para harvesting, y, el storage de energía, se realizó a través de un circuito, que consta de; Una entrada de señales aleatorias, en AC, provenientes de la plantilla piezoeléctrica. Un puente de diodos a 2 A, que regula y convierte las señales piezoeléctricas a DC. Un capacitor de rápida carga y descarga, tipo RUBYCON, de 180uf 330V, que realiza el storage de energía.
- Para alimentar a la carga, en el circuito de conversión y storage, se contempla la instalación de un sócalo de 8 pines, que permite la conexión de LEDs y multímetro.
- La descripción analítica de la piezogeneración, permite aproximar los procesos mecánicos y eléctricos, y, calculando con relativa exactitud el nivel máximo de voltaje que se puede alcanzar para un material piezoeléctrico dado.
- Para cada una de las plantillas piezoeléctricas construidas, se obtuvo diferentes series de peso del caminante vs tiempo requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga. Especial atención merece el hecho de que a mayor peso del caminante, el tiempo requerido sea menor.
- El mejor desempeño se observó en la plantilla en la cual, las células piezoeléctricas son sometidas a deflexión. Sin embargo, los límites de desempeño están relacionados al límite de deflexión del material piezoeléctrico, tal como se demostró con destrucción mecánica de las piezocélulas, ocurrido durante la experimentación.

## RECOMENDACIONES

- Al emplear cualquier elemento piezoeléctrico, se debe tener muy en cuenta las características técnicas piezoeléctricas, sus límites de desempeño están relacionados con su máximo de deflexión soportado.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- Construcción de un zapato completamente piezoeléctrico para atletas de elite, de excelente sensibilidad, flexibilidad, y resistencia para storage de energía de una manera más eficiente.

## REFERENCIAS

- [1] GONZÁLEZ, Sandra. JARAMILLO Jorge Luis. "Metodología de diseño de un generador piezoeléctrico para harvesting de energía", sitio web "Quasar 0360-7912" paper [en línea]. Entrada 24 de septiembre del 2012. Consultado 2012-10-10. URL: <http://es.scribd.com/doc/106829336/Metodologia-de-diseno-de-un-generador-piezoelctrico>
- [2] "Energy harvesting con tecnología piezoeléctrica", sitio web "Energy harvesting con tecnología piezoeléctrica | Zigbee labs" [en línea]. Entrada 2 Sep. 2010. Consultado 2012-10-12. URL: <http://www.zigbee.net/archivos/441>
- [3] SHENCK, Nathan S. "A Demonstration of useful electric Energy generation from Pizoceramics in a shoe", sitio web "A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezceramics" documento [en línea]. Entrada 24 de septiembre del 2012. Consultado 2012-10-10. URL: <http://ftp.it.murdoch.edu.au/units/ICT219/Papers%20for%20transfer/Nate-Thesis-Final.pdf>
- [4] "CENIDET", [en línea], consultado 2012-11-16, URL: [http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis\\_mc/128MC\\_avb.pdf](http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis_mc/128MC_avb.pdf)
- [5] MERINO, V. JARAMILLO, J. "Una aproximación a la naturaleza de la piezoelectricidad", sitio web "Quasar 0360-7912", paper en [línea], entrada noviembre 7 del 2012, consultado 2012-12-13 URL: <http://es.scribd.com/doc/112499018/naturaleza-de-la-piezoelectricidad>
- [6] MERINO, V. JARAMILLO, J. "Utilización de baldosas piezoeléctricas para harvesting de energía", documento word entregado por autores de paper.
- [7] MERINO, V. JARAMILLO, J. "Caracterización del desempeño de baldosas piezoeléctricas PowerLeap", documento word entregado por autores de paper.
- [8] LEOPOLDO, F. YABAR, E. DANIEL, O. CARCIA, R CONDOR, Cristian. VILLAVICENCIO, Emilio. "estudio para el diseño de un Sistema Baropodométrico Electrónico" [en línea. Consultado 2013-04-26. URL: <http://www.bioingenieria.edu.ar/grupos/geic/biblioteca/archivos/Trabypres/T08TC Pe07.pdf>
- [9] MORENO, J. C. FERNANDEZ, J. F. OCHOA, P. CERES, R. CALDERON, L. RONCON, E. PONS, J. L. "Aplicación de sensores piezoeléctricos cerámicos a la caracterización biomecánica, [en línea] consultado 2013-03-04, URL: <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fceramicayvidrio.revistas.csic.es%2Findex.php%2Fceramicayvidrio%2Farticle%2Fdownload%2F473%2F493&ei=N0s-UZCaDlyN0QHj7YGIDA&usq=AFQjCNG12-4owGzVqzLrUXZK6hbRFHFk6w>
- [10] "Estudio del patrón de presiones plantares", sitio web [en línea], consultado 2013-03-02, URL: [http://clinicadelpieembajadores.com/estudio\\_del\\_patron\\_de\\_%20presiones\\_plantares\\_en\\_pies\\_con\\_hallux\\_valgus\\_mediante\\_un\\_sistema\\_de\\_plantillas\\_instrumentalizadas.pdf](http://clinicadelpieembajadores.com/estudio_del_patron_de_%20presiones_plantares_en_pies_con_hallux_valgus_mediante_un_sistema_de_plantillas_instrumentalizadas.pdf)
- [11] PARADISO, Joe. KENDALL, Jake. KYMISSIS, John. SHENCK, Nate. "Parasitic Power Harvesting in Shoes", [en línea], Consultado 2012-12-25. URL: <http://resenv.media.mit.edu/power/index.html>



- [12] Biomecánica: una mirada al funcionamiento de nuestro cuerpo, [Online]. Disponible en: [http://octi.guanajuato.gob.mx/octigto/formularios/ideasConcyteg/Archivos/210220\\_07\\_BIOMECANICA\\_MIRADA\\_CENTRO\\_NUESTRO\\_CUERPO.pdf](http://octi.guanajuato.gob.mx/octigto/formularios/ideasConcyteg/Archivos/210220_07_BIOMECANICA_MIRADA_CENTRO_NUESTRO_CUERPO.pdf) [Consulta: Agosto 2012]
- [13] "Charge your cell phone on the go!", artículo [en línea], URL: <http://iseeindia.com/2012/02/20/charge-your-cell-phone-on-the-go/>
- [14] "Power Walking", sitio web, "Tech Resources", artículo [en línea] URL: [http://stab-iitb.org/wiki/Power\\_Walking](http://stab-iitb.org/wiki/Power_Walking)
- [15] "Sensores piezoeléctricos ", sitio web [en línea], consultado 2012-10-10, URL: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040003/lecciones/cap3lecc8.htm>
- [16] "Recolección de energías ambientales mediante materiales cerámicos y mono cristales", sitio web, "CIDIDI centro de investigación, innovación y diseño de ingeniería", [en línea]. Consultado 2012-10-15, URL: [http://laboratorios.fi.uba.ar/cididi/webcididi/notastecnicas\\_pdf/lic\\_juarez1.pdf](http://laboratorios.fi.uba.ar/cididi/webcididi/notastecnicas_pdf/lic_juarez1.pdf)
- [17] "Cerámica piezoeléctrica" [en línea] consultado 2013-04-04 URL: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cer%C3%A1mica\\_piezoel%C3%A9ctrica](http://es.wikipedia.org/wiki/Cer%C3%A1mica_piezoel%C3%A9ctrica)
- [18] KENDALL, Clyde Jake. "Parasitic Power Harvesting in Shoe Mounted Devices", Tesis [en línea], Consultado 2012-12-25. URL:<http://resenv.media.mit.edu/power/index.html>
- [19] PERÉZ, Miguel. ÁLVAREZ, Juan. CAMPO, Juan. FERRERO, Fco Javier. GRILLO, Gustavo. "INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA", Editorial THOMSON. 2004
- [20] PREIDIKMAN, Sergio. MASSA, Julio. BANDA, María. "Accionamiento mediante actuadores piezoeléctricos de alas flexibles para micro-vehículos aéreos" paper, sitio web [en línea]. Entrada noviembre 2006. Consultado 2013-03-04. URL: <http://www.amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/616/586%20rel=&>
- [21] GONZÁLEZ, René. "Diseño y Caracterización mediante el método de los elementos finitos de un transductor ultrasónico para aplicaciones médicas", Tesis [en línea]. Consultado: 2013-06-21. URL: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/290/Tesis.pdf?sequence=1>
- [22] "Cuál es un transductor piezoeléctrico", sitio web, "¿Cuál es un transductor piezoeléctrico?", [en línea]. Consultado 2012-11-11. URL: <http://web63.justhost.com/~xentrop1/Cu%C3%A1l-es-un-transductor-piezoel%C3%A9ctrico.php>
- [23] "Sensores de presión" sitio web, "Sensores de presión-parte I" [en línea]. Consultado 2012-10-12. URL: [http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080306-Sensores-parte\\_III.presion.pdf](http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080306-Sensores-parte_III.presion.pdf)
- [24] COSÍN, ANDRADAS, David. "Diseño y desarrollo de un sensor basado en materiales piezoeléctricos", sitio web [en línea], consultado 2013-05-22. URL: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/449a920b36434.pdf>
- [25] GRETARSSON, Dagur. "Energy Harvesting using Piezoelectric Generators", February 7, 2007

- [26] BOYLESTAD, Robert. NASHELSKY, Louis. "ELECTRÓNICA: TEORÍA DE CIRCUITOS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS", octava edición 2003.
- [27] "adquisición de datos y procesamiento de señales", [en línea], consultado 2012-11-21, URL: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/73/11/Capitulo3.pdf>
- [28] [http://prezi.com/4gewekhb7zdb/easy-power/?utm\\_source=website&utm\\_medium=prezi\\_landing\\_related\\_solr&utm\\_campaign=prezi\\_landing\\_related\\_author](http://prezi.com/4gewekhb7zdb/easy-power/?utm_source=website&utm_medium=prezi_landing_related_solr&utm_campaign=prezi_landing_related_author)
- [29] MUNGUIA, Gabriela. "Sensor piezoeléctrico", sitio web [en línea], entrada 2012-08-20, consultado 2012-12-12. URL: <http://www.ceiarteuntref.edu.ar/badarte/node/138>
- [30] L. Prat, R. Bragós, M. Fernández, V. Jiménez, "Circuitos y dispositivos electrónicos". Ediciones UPC, 1999.
- [31] EGGBORN, Timoteo. "Modelos analíticos para predecir cosecha de energía con materiales piezoeléctricos", consultado, [en línea], 2012-12-29, URL: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05192003-150202/unrestricted/EggbornThesis1.pdf>
- [32] "S.T.E.P.S. (Sole Topography Energy-harvesting Piezo Shoes)", artículo [en línea], consultado 2013-02-19, URL: [http://translate.google.com.ec/translate?hl=es&langpair=en|es&u=http://beaversource.oregonstate.edu/projects/44x201208/wiki/TechnologyResearch&ei=ssQjUez9GI\\_W8gTC24HoCQ](http://translate.google.com.ec/translate?hl=es&langpair=en|es&u=http://beaversource.oregonstate.edu/projects/44x201208/wiki/TechnologyResearch&ei=ssQjUez9GI_W8gTC24HoCQ)
- [33] "Pisando y generando Piezoelectricidad", sitio web "Pisando y generando – Feria de Ciencias", [en línea]. Consultado 2012-11-11. URL: [http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria18/F\\_L\\_DT%20Pisando\\_y\\_generando.pdf](http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria18/F_L_DT%20Pisando_y_generando.pdf)
- [34] "Características del zumbador", artículo [en línea], URL: <http://www.ceiarteuntref.edu.ar/badarte/node/138>
- [35] "Que es un piezoeléctrico Zumbador", consultado 2012-11-05, artículo [en línea], URL: <http://www.comohacerunabateriaelectronica.com/construirunkitpasoapaso/lospiezoelectricos/queesunpiezoelectrico-164.html>
- [36] MUNGUIA, Gabriela. "Sensor piezoeléctrico", sitio web [en línea], entrada 2012-08-20, consultado 2012-12-12. URL: <http://www.ceiarteuntref.edu.ar/badarte/node/138>
- [37] "Piezo tweeter application note", sitio web, Pulsar Development ltd, artículo [en línea], consultado 2013-01-25, URL: <http://www.pulsardevelopments.com/products/detail/piezoan.html>
- [38] "Datos técnicos del zumbador", artículo [en línea], URL: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/20mm-piezo-ceramic-element-543962117.html>
- [39] Hoja de datos de CEB27D44, [en línea], consultado 2013-08-01, URL: <http://www.cui.com/product/resource/ceb-27d44.pdf>
- [40] "PZT5A & 5H Materials Technical Data (Typical Values), hoja de datos [en línea], consultado 2013-07-23. URL: <http://www.datasheetarchive.com/PZT5A-datasheet.html>
- [41] ALVES, PEREIRA, Antonio Henrique. "Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades", sitio web, Cerámicas piezoeléctricas- ATCP Engenharia física, pdf [en línea], consultado 2013-07-23. URL:

- <http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/RT-ATCP-01-%5BES%5D.pdf>
- [42] “CUI INC” descripción del piezoeléctrico  
<http://www.cui.com/product/resource/ceb-27d44.pdf>
- [43] “Datos técnicos del zumbador”, artículo [en línea], URL:  
<http://spanish.alibaba.com/product-gs/20mm-piezo-ceramic-element-543962117.html>
- [44] “Características de un led de luz brillante”, en línea, URL:  
<http://dled.com.ar/led-8mm-amarillo>
- [45] “Características del capacitor”, en línea URL:  
<http://www.wellgainelectronics.com/rubycon180uf330vphotoflash18x26mm.aspx>

# ANEXOS

**ANEXO 1. PAPER: “INGENIERÍA DE DETALLE Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE PLANTILLAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA A TRAVÉS DEL CALZADO”**

# Ingeniería de detalle y análisis del desempeño de un sistema de plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía a través del calzado.

Manolo Quizhpe<sup>#1</sup>, Jorge Luis Jaramillo<sup>#2</sup>

*#1 Profesional en formación Universidad Técnica Particular de Loja*

*#2 Docente de le EET, Universidad Técnica Particular de Loja*

*Loja, ecuador 2012*

[1mmquizhpex@utpl.edu.ec](mailto:mmquizhpex@utpl.edu.ec), [2jorgeluis@utpl.edu.ec](mailto:jorgeluis@utpl.edu.ec)

**Resumen**—El harvesting es el proceso por el cual se captura y almacena fracciones de energía "suelta". Una forma de energía potencialmente cosechable es la humana, especialmente la empleada para la locomoción. Los sistemas de efecto piezoeléctrico son ampliamente utilizados para capturar esta energía, especialmente a través del calzado. Para este tipo de aplicaciones, se emplean cerámicas piezoeléctricas, muy sensibles a la excitación externa, mecánica o eléctrica. Cerámicas tipo PZT (titanato zirconato de plomo) o de polímero PVDF (poli fluoruro de vinilideno). En este documento, se explica el estado actual del harvesting de energía al caminar, se detalla la ingeniería de diseño, y se analiza el desempeño de 3 plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía en el calzado, propuestas por el grupo de trabajo.

**Palabras claves**—energía, harvesting de energía, piezoelectricidad, efecto piezoeléctrico, generadores piezoeléctricos, harvesting de energía a través del calzado, plantillas piezoeléctricas.

## I. INTRODUCCIÓN

En 1995, los laboratorios de investigación sobre cosecha de energía residual del MIT, realizaron estudios para determinar las partes del cuerpo humano, de mayor potencial de aprovechamiento, concluyendo que del choque del talón era factible obtener energía. Las pruebas mostraron que una persona de 68 Kg de peso, podría generar hasta 67W de potencia, durante una marcha de paso rápido (2 pasos por segundo), bajo ciertas condiciones [1]. En los estudios se emplearon ingenios de baja frecuencia adecuados en el calzado.

Actualmente, se puede encontrar en el mercado diferentes aplicaciones que utilizan el efecto piezoeléctrico para capturar energía a través del calzado, y, que proveen de

energía a cargas de bajo consumo como baterías, lámparas, y, otras. Todo esto es posible gracias a los materiales piezoeléctricos, de gran utilidad por su replicabilidad, y, al apareamiento de dieléctricos elásticos y generadores rotatorios [2], [3].

Adicionalmente al analizar el comportamiento de la piezoelectricidad, es importante conocer la naturaleza del elemento accionante y del elemento accionado, y, entender la interacción entre ambos [2]. Quedando implícitas las aproximaciones físicas más aceptadas de piezoelectricidad, descripción matemática del proceso de captura y transformación de energía en los piezoeléctricos.

En el marco de una de las iniciativas impulsadas por la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE de la UTPL, se diseñó e implementó 3 prototipos de plantillas piezoeléctricas para la captura de energía en el calzado. En este documento, se explica el estado actual del harvesting de energía al caminar, se detalla la ingeniería de diseño, y, se analiza el desempeño de 3 plantillas piezoeléctricas para harvesting de energía en el calzado, propuestas por el grupo de trabajo.

## II. BREVES NOCIONES DE LOCOMOCIÓN HUMANA, Y, HARVESTING DE ENERGÍA A TRAVÉS DEL CALZADO

La biomecánica ayuda a describir el “ciclo de la marcha”, proceso repetitivo en la locomoción humana. Tal como la muestra la Fig.1, en un paso completo se presentan cinco fases [4], [5]:

- Contacto del talón, cuando el talón empieza a hacer contacto con el suelo
- Apoyo plantar, cuando la parte anterior del pie hace contacto con el suelo

- Apoyo medio, cuando el trocánter mayor se encuentra alineado verticalmente con el centro del pie, visto desde el plano sagital (el peso total recae sobre el pie).
- Elevación del talón
- Despegue del pie, cuando los dedos se elevan del suelo



**Fig.1.** Intervalos de la fase de apoyo. CT: contacto del talón, AP: apoyo plantar, AM: Apoyo medio, ET: Elevación del talón, DP: Despegue del pie. Intervalos: Aceptación del peso, Apoyo medio y Despegue del pie.

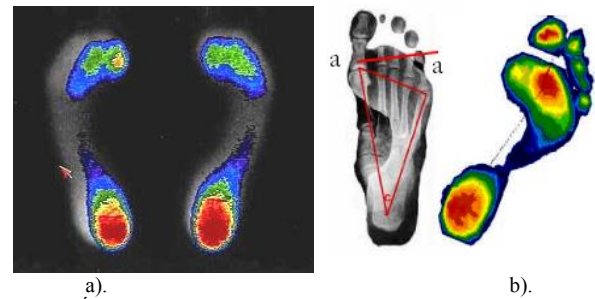
Al considerar el balanceo, durante el cual solo un pie se esfuerza mientras que el otro se encuentra en el aire por unos segundos, a las fases descritas se debe añadir tres momentos adicionales [5], [6]:

- La aceleración, en la que los dedos dejan el suelo
- El balanceo medio, en la que el pie queda en péndulo sin tocar el suelo, propiciando a que el otro pie sea el de apoyo
- La desaceleración, que permite llegar al paso siguiente en forma sostenida

En cada una de estas fases de un paso completo, las fuerzas actúan de forma equilibrada, distribuida, y, proporcionada. Cuando una persona está de pie, el peso total se distribuye entre las dos piernas, mientras que cuando camina, durante una fracción de tiempo el peso total es soportado por una sola pierna [5].

#### A. Plantillas piezoeléctricas

La **baropodometría** estudia la presión plantar durante el apoyo del cuerpo, mantención del equilibrio, y, el inicio de la marcha, empleando diversas técnicas como el uso de plataformas de sensores triaxiales, sensores tipo plantilla, hidroceldas, micro cápsulas, entre otras [7], [8]. Estudios realizados con FSR [9], han definido las áreas de mayor presión plantar en reposo y durante la marcha, registrando valores entre 1 y 1,3 Kg/cm<sup>2</sup> (ver Fig. 2), mientras que otros ensayos [6] han permitido aproximar la relación entre el peso y energía generada sobre baldosas piezoeléctricas (ver Tabla 1)



**Fig. 2.** Áreas de mayor presión en el pie: a) en reposo, b) al caminar

**Tabla 1.** Voltaje promedio de salida en un elemento piezoeléctrico en función del peso y de la fase del paso

Altura (m)	Peso (Kg)	Voltaje promedio salida (V)		
		Contacto del talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
0,60	12	-15,07	-8,40	1,33
1,20	25	-26,72	-15,34	2,33
1,40	38	-41,49	-27,47	3,91
1,50	45	-61,03	-34,99	9,04
1,55	50	-67,3	-35,91	9,01
1,75	58	-71,05	-46,26	7,45
1,60	60	-73,47	-37,28	8,51
1,55	70	-108,24	-63,043	9,40
1,78	116	-163,21	-79,77	13,15

La concentración de fuerzas de acción y reacción, facilitan la contracción y la elongación del material piezoeléctrico ubicado en el calzado, a través de plantillas que actúan como filtros pasa bajas. Durante la marcha, se producen deformaciones diferentes por encima y por debajo de la plantilla piezoeléctrica, lo que provoca una diferencia de potencial entre las capas, y cuya energía es capturada por el sistema de harvesting.

#### Plantilla de polifluoruro de vinilideno PVDF

Esta plantilla piezoeléctrica tiene forma de una duela bimorfa (ver Fig. 3). Sobre un sustrato de plástico flexible, se deposita 28 micras de material piezoeléctrico, y, se despliegan 8 multicapas por debajo y por encima. La estructura final tiene la forma de un pentágono, y, se ajusta en el calzado, en la región de presión del talón [10].



**Fig. 3.** Plantilla PVDF en forma de pentágono

Las multicapas una sobre otra, y, conectadas en paralelo, se deforman al mismo tiempo. Esto hace que disminuya la impedancia característica del sistema, y, que se produzca una capacitancia neta máxima acompañada de una alta corriente. La Fig.4, muestra el diagrama eléctrico de esta plantilla.

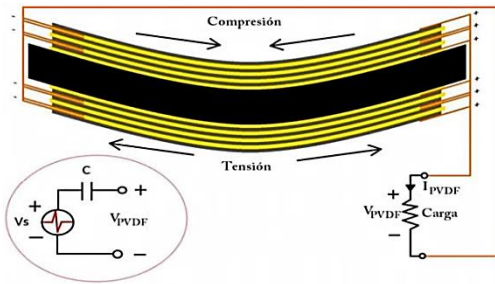


Fig. 4. Diagrama eléctrico de una plantilla PVDF multicapas [10]

### Plantilla de zirconato titanato de plomo PZT

Esta plantilla de diseño semi-curvo, fue desarrollada por la NASA. Consta de una tira de acero uniforme, unida a un parche de cerámica piezoeléctrica modificada, que le permite cierto rango de flexibilidad (Ver Fig. 5 [10]).



Fig.5. Plantilla PZT uniforme

La superficie rígida de la plantilla, facilita a una gran deformación y elongación del material piezoeléctrico, lo que influye en los valores del voltaje pico y de potencia promedio. Este efecto puede ser optimizado, empleando estructuras, en la que se combinan dos plantillas PZT.

La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos en pruebas efectuadas con plantillas PVDF y PZT, en condiciones similares, mostrando un mejor desempeño de la plantilla PZT.

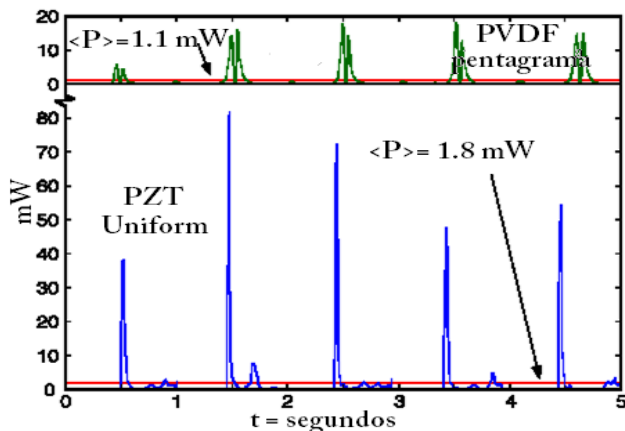


Fig.6. Resultados de voltaje y potencia con plantillas PVDF y PZT. Voltaje pico verde PVDF y azul PZT, y, potencia promedio rojo para ambos [11]

Diferentes tipos de calzado, modifican el sistema de fuerzas de reacción en contraposición a la marcha humana. La mejor performance en un piezoeléctrico se logra en calzado de horma flexible, por cuanto una mayor deformación, y, una pronta recuperación de la forma original, facilitan la generación de un mayor tren de pulsos de energía [7], [11].

### III. PIEZOELECTRICIDAD

Piezoelectricidad es la propiedad de algunos materiales, de polarizarse eléctricamente, ante una fuerza deformativa externa. Esta propiedad fue descubierta por Jacques y Pierre Curie, en 1880, quienes determinaron que ciertos materiales al deformarse por acción de una fuerza, sufrían una polarización eléctrica proporcional a la fuerza aplicada [2], [4].

Durante la deformación - generación piezoeléctrica, no toda la energía mecánica se convierte en eléctrica. La regresión del material a su estado natural, provoca que parte de la energía se acumule elásticamente (como en un resorte), y, que otra sea convertida en cargas que generan un campo eléctrico [12].

#### A. Polarización piezoeléctrica

La revisión bibliográfica muestra que, los materiales piezoeléctricos fabricados, pueden polarizarse en 3 direcciones análogas posibles (x, y, z), aceptándose que el tercer eje es paralelo al sentido de polarización (ver Fig. 7).

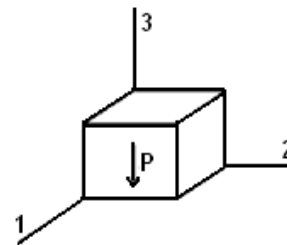


Fig. 7. Cerámica piezoeléctrica ejes y dirección de polarización. [4]

#### B. Constantes piezoeléctricas.

Las constantes piezoeléctricas se relacionan con las propiedades de los materiales piezoeléctricos [13].

#### Constante de carga piezoeléctrica d

La constante de carga piezoeléctrica d, indica la proporción entre la variación dimensional ( $\Delta l$ ) del material piezoeléctrico (m), y, la diferencia de potencial aplicada (V); ó, la relación entre la generación de cargas eléctricas (C), y, la fuerza aplicada en el material (N) (ver expresiones (1) y (2)).

$$d = \frac{\text{variación dimensional}}{\text{potencial aplicado}} \quad (1)$$

$$d = \frac{\text{densidad de cargas}}{\text{fuerza aplicada}} \quad (2)$$



### Constante de tensión piezoeléctrica g

La constante de tensión piezoeléctrica g, es la relación entre el campo eléctrico creado en una cerámica de longitud l m, y, el esfuerzo mecánico aplicado (ver expresión (3)). Se mide en Vm /N.

$$g = \frac{\text{campo desarrollado}}{\text{esfuerzo mecánico aplicado}} \quad (3)$$

### Coeficiente de acoplamiento K

La constante de acoplamiento K es una unidad adimensional, que muestra la eficiencia del material en la transducción, ó, la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa (ver expresiones (4) y (5)).

$$K = \sqrt{\frac{\text{energía mecánica almacenada}}{\text{energía eléctrica aplicada}}} \quad (4)$$

$$K = \sqrt{\frac{\text{energía eléctrica almacenada}}{\text{energía mecánica aplicada}}} \quad (5)$$

### Factor de calidad mecánico Q

El factor de calidad mecánico Q, es una unidad adimensional, que muestra la medida del amortiguamiento en el material.

### Factor de disipación tanδ

El factor de disipación tanδ, es una unidad adimensional, que muestra el potencial dieléctrico del material.

### Temperatura de Curie TC

La temperatura de Curie TC, indica la temperatura límite que soporta una estructura cristalina de piezoeléctrico. Al exceder esta temperatura, se pierden las propiedades piezoeléctricas y la polarización inducida en el material. El piezoeléctrico se torna inservible como transductor de energía eléctrica en mecánica. Para los PZT, esta temperatura tiene valores típicos de 150 a 350 ° C.

### Constante de frecuencia N

La constante de frecuencia N estima la frecuencia de resonancia de los dispositivos piezoeléctricos. Para los PZT, esta constante tiene valores típicos de 800 a 3000 Hz m.

### C. Tipos de materiales piezoeléctricos

De acuerdo a la bibliografía [4], existen 6 tipos de materiales piezoeléctricos.

El **Navy Type I** (“Hard”), es un material usado en aplicaciones de media y alta potencia, en condiciones de uso

continuo y repetitivo. Este material es capaz de generar altas amplitudes de vibraciones, manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas. Se utiliza en sistemas de limpieza por ultrasonido y sonares. Comercialmente, se conoce como PZT-4.

El **Navy Type II** (“Soft”), es un material que posee alta sensibilidad. Este material es ideal para la transmisión y recepción en dispositivos de baja potencia. Presenta pérdidas dieléctricas y mecánicas que, impiden la excitación continua con alta intensidad. Se emplea en ensayos no destructivos, como hidrófonos y acelerómetros. Comercialmente, se conoce como PZT-5A.

El **Navy Type III** (“Hard”), es un material de características similares al Navy Type I, pero menos sensible, capaz de convertir el doble de potencia, manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas. Es recomendado en aplicaciones que precisen de alta potencia, como sistemas de soldadura por ultrasonidos y procesamiento. Comercialmente, se conoce como PZT-8.

El **Navy Type IV** (“Soft”), es un material adecuado para aplicaciones de potencia media, como manutención de equipos antiguos. Se conoce en el mercado, como titanato de bario.

El **Navy Type V** (“Soft”), es un material adecuado para aplicaciones que requieren alta energía y diferencia de potencial, como detonadores de impacto. Comercialmente, se conoce como PZT-5J.

El **Navy Type VI** (“Soft”), es un material adecuado para aplicaciones que requieren grandes deformaciones mecánicas, como actuadores y posicionadores. Comercialmente, se conoce como PZT-5H.

### D. Efecto piezoeléctrico

En un material piezoeléctrico, la compresión o tensión aplicada, hace que la distancia entre los dipolos de la estructura piezoeléctrica cambie, y, que se cree un campo eléctrico, y, como resultado, carga en la superficie [14]. Este proceso físico, conocido como efecto piezoeléctrico, determina la conversión energética en materiales PZT o PVDF [14], [15], [16].

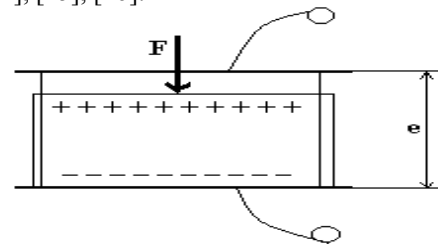


Fig. 8. Comportamiento de los materiales piezoeléctricos [7]

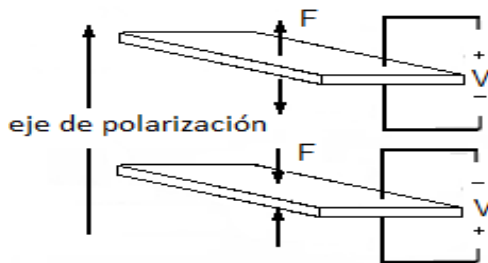
La piezoelectricidad se extrae, a través de chapas o electrodos en las superficies del material. Chapas de plata o cobre. [16].

El **efecto piezoeléctrico directo**, se exhibe cuando una fuerza o vibración mecánica en el piezoeléctrico, genera una carga o voltaje entre sus terminales [3]. La polaridad del material depende del tipo de esfuerzo.

El **efecto piezoeléctrico inverso** aparece, cuando aplicando un campo eléctrico o voltaje al piezoeléctrico, se produce un cambio dimensional o deformación. La dirección del campo depende de la dirección de polarización [3].

*E. Polaridad de carga*

Específicamente en el efecto directo, la polaridad de carga depende del tipo de esfuerzo, tal como muestra la Fig. 9. Es posible obtener una diferencia de potencial o voltaje, con la misma polaridad que el eje de la lámina, ante una descompresión o estiramiento del material piezoeléctrico; ó, una diferencia de potencial o voltaje, opuesta al eje de la lámina, por la compresión del material piezoeléctrico.



**Fig. 9.** Polaridad de una lámina piezoeléctrica: Superior) si la fuerza estira el piezoeléctrico. Inferior) si la fuerza comprime el piezoeléctrico. [8]

El comportamiento electromecánico de todo material piezoeléctrico, presenta modos de vibración y polarización, determinados por la geometría del mismo elemento y sus propiedades mecánico elástica (ver Tabla 2).

**Tabla2.** Modos de polarización y vibración de cerámicos [17]

Forma	Ejes	Polarización	Voltaje	Modos de vibración
Placa				
Disco fino				
Cubo				
Tubo				

*F. Ecuaciones piezoeléctricas*

Cuando existen 2 partículas cargadas eléctricamente en igual magnitud (q). y. distinto signo, separadas una distancia (l), se produce un momento eléctrico o momento dipolar, tal como lo muestra la ecuación característica (6) [18].

$$p = ql \quad (6)$$

En dónde,

- p, es el momento eléctrico, momento dipolar.
- l, es la distancia entre la carga negativa y positiva, m
- q, es la carga, C

En la deformación, el campo eléctrico se manifiesta como una diferencia de potencial, determinada por la expresión (7).

$$E = -\nabla V \quad (7)$$

Ecuaciones para el efecto piezoeléctrico directo

El dipolo eléctrico medio (P), desarrollado por una tensión extensiva (T), paralela a su eje de polarización, se describe por la expresión (8).

$$P = dT \quad (8)$$

En dónde,

- P, el dipolo eléctrico medio, C/m<sup>2</sup>, N/Vm.
- d, es constante de carga piezoeléctrica a tensión C/N, ó, m/V
- T, es la tensión aplicada, N/m<sup>2</sup>

En función del campo eléctrico (E), y, del desplazamiento eléctrico, el dipolo se expresa a través de la ecuación (9).

$$P = D - \epsilon^T E \quad (9)$$

En dónde,

- P, es el dipolo, C/m<sup>2</sup>.
- D, es el desplazamiento eléctrico, C/m<sup>2</sup>
- $\epsilon$ , es permitividad dieléctrica, C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>
- E, es el campo eléctrico, V/m, ó, N/C

Como resultado, un *transductor piezoeléctrico*, se describe matemáticamente, a través de las expresiones (10) y (11).

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (10)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\epsilon^T} \quad (11)$$

En dónde,

- D, es desplazamiento eléctrico por fuerza aplicada, C/m<sup>2</sup>
- d, es constante de carga piezoeléctrica a tensión, C/N, ó, m/V

$T$ , es la tensión aplicada,  $N/m^2$ .  
 $\epsilon^T$  es la permisividad a tensión constante,  $C^2/Nm^2$   
 $E$ , es el campo eléctrico,  $V/m$ , ó,  $N/C$   
 $g$ , es constante de carga piezoeléctrica,  $Vm/N$

#### Ecuaciones para el efecto piezoeléctrico indirecto

El material piezoeléctrico, al estar sometido a un campo eléctrico, se deforma, proceso descrito por la ecuación (12).

$$S = dE \quad (12)$$

En dónde,

$S$ , es la deformación mecánica,  $m^2/N$   
 $d$ , es constante piezoeléctrica a tensión  $C/N$ , ó,  $m/V$ .  
 $E$ , es el campo eléctrico  $V/m$ , ó,  $N/C$

$$S = gD \quad (13)$$

En dónde,

$S$ , es la deformación mecánica,  $m^2/N$   
 $g = \frac{d}{\epsilon^T}$ , es constante de carga piezoeléctrica,  $Vm/N$   
 $D$ , es el desplazamiento eléctrico,  $C/m^2$

El alargamiento experimentado en un medio elástico sujeto a tensión, sigue la ley de Hooke,  $y$ , se expresa por la ecuación (14).

$$S = sT \quad (14)$$

En dónde,

$S$ , es la deformación mecánica,  $m^2/N$   
 $T$ , es la tensión aplicada,  $N$   
 $s$ , es la compilación del medio,  $m^2/N$ .

Como resultado, un *actuador piezoeléctrico*, se describe a través de las ecuaciones (15) y (16).

$$S = s^E T + dE \quad (15)$$

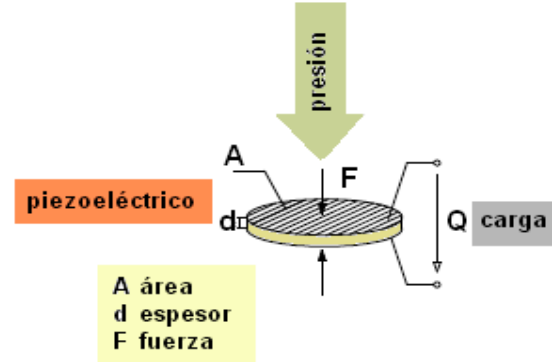
$$S = s^D T + gD \quad (16)$$

En dónde,

$S$ , es la deformación mecánica,  $m^2/N$   
 $s^E, s^D$  son las conformidades específicas elásticas, para un campo eléctrico constante.  $s^E$ , es la flexibilidad que se produce bajo un desplazamiento dieléctrico constante,  $y$ ,  $s^D$ , es la flexibilidad bajo un campo eléctrico constante,  $m^2/N$ .  
 $T$ , es la tensión aplicada,  $N$   
 $d$ , es constante de carga piezoeléctrica a tensión,  $C/N$ , ó,  $m/V$   
 $E$ , es el campo eléctrico,  $V/m$ , ó,  $N/C$   
 $g$ , es constante de carga piezoeléctrica,  $Vm/N$   
 $D$ , es el desplazamiento eléctrico por fuerza aplicada,  $C/m^2$

#### IV. GENERADORES PIEZOELÉCTRICOS.

Los transductores piezoeléctricos son elementos de alta eficiencia, debido a las mínimas pérdidas [12], [19]. A partir de una entrada mecánica, los transductores piezoeléctricos, convierten la presión sana en voltaje eléctrico (ver Fig. 10) [20] [21].

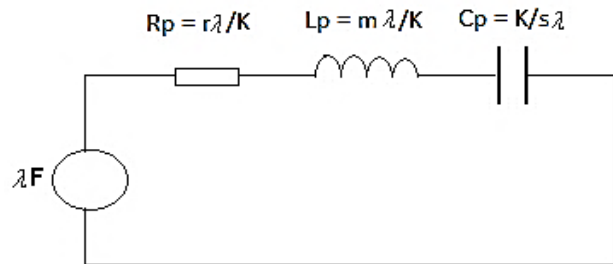


**Fig. 10.** Esquema de funcionamiento de un transductor piezoeléctrico. [20], [21]

La eficiencia de la conversión de energía en el piezoeléctrico, depende de factores como la variación de la fuerza aplicada, la impedancia de la carga conectada al generador (que podría depolarizarlo [2]); y, del comportamiento inercial, elástico,  $y$ , viscoso del material (que provocan fuerzas de contraposición [22]).

##### A. Materiales piezoeléctricos como generadores

Cerca de la resonancia mecánica, un material piezoeléctrico se puede caracterizar por el circuito equivalente mostrado en la Fig. 11 [16], [23].



**Fig. 11.** Circuito eléctrico análogo equivalente al comportamiento de un sensor piezoeléctrico [12]

La suma de los comportamientos inercial, elástico,  $y$ , viscoso del material, provoca la aparición de fuerzas que contrarrestan el efecto de la fuerza aplicada, tal como se describe en la formula (17).

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + sx \quad (17)$$

En dónde,

$m$ , es la masa del material,  $kg$

$r$ , es el coeficiente de rozamiento (viscosidad), Pa \* s  
 $s$ , es el coeficiente elástico, m<sup>2</sup>/N.  
 $x$ , es la deformación total producida, N/m.

El efecto piezoeléctrico, provoca la aparición de carga directamente proporcional a la deformación producida,  $x$ , inversamente proporcional al espesor ( $e$ ) del material, tal como lo muestra la expresión (18).

$$q = \frac{k'}{e} x \quad (18)$$

En dónde,

$q$ , es la carga, C  
 $e$ , es la distancia de separación de los electrodo, m  
 $k'$ , es un constante de variabilidad de la deformación producida, C/N.  
 $x$ , es la deformación total producida, N/m.

Si los terminales del dispositivo piezoeléctrico se cierran sobre un circuito, aparece una corriente eléctrica descrita por la expresión (19). La corriente es proporcional a la velocidad de variación de la deformación.

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{k'}{e} \frac{dx}{dt} = k \frac{dx}{dt} \quad (19)$$

Con estas consideraciones, la ecuación (18) se convierte en la expresión (21), que describe la operación de un circuito RLC, en serie, con una fuente de voltaje.

$$F = \frac{m}{K} \frac{di}{dt} + \frac{r}{K} i + \frac{s}{K} \int i dt \quad (20)$$

Al aplicar la expresión (20) al circuito mostrado en la Fig.6, se obtiene la expresión (21).

$$v = \lambda F = R_p i + L_p \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_p} \int i dt \quad (21)$$

En dónde,

$\lambda$ , es el factor de conversión dimensional.  
 $v$ , es potencial de salida, V  
 $F$ , es la fuerza aplicada, N  
 $R_p$ , es la resistencia característica del piezoeléctrico,  $\Omega$ .  
 $L_p$ , es la inductancia del piezoeléctrico, H.  
 $C_p$ , es la capacitancia del piezoeléctrico, C.

En el circuito equivalente, el comportamiento piezoeléctrico se describe a través de la variabilidad de la capacitancia del material ( $C_p$ ), representada por dos capacitores C1 y C2 (ver Fig. 12).

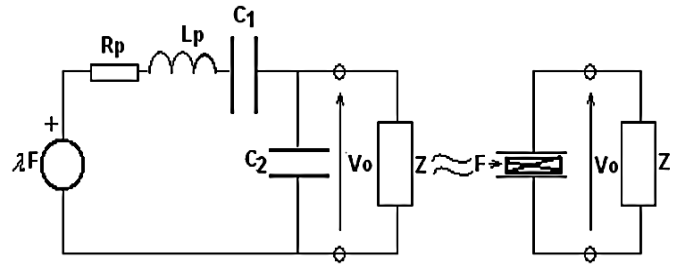


Fig. 12. Circuito eléctrico modificado cargado con una impedancia [16]

El equivalente en serie de los capacitores C1 y C2, forma la capacidad del piezoeléctrico  $C_p$ , y, el equivalente en paralelo representa la capacidad construida  $C$ , definidas ambas por las expresiones (22) y (23) [16] [24].

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (22)$$

$$C = C_1 + C_2 \quad (23)$$

Considerando estas equivalencias, las expresiones (22) y (23), se pueden convertir en las ecuaciones (24) y (25).

$$C_2 = \frac{C + \sqrt{C^2 - 4 \frac{k}{\lambda s} C}}{2} \quad (24)$$

$$C_1 = \frac{C - \sqrt{C^2 - 4 \frac{k}{\lambda s} C}}{2} \quad (25)$$

En dónde,

$C_p$ , es la capacidad del piezoeléctrico, F  
 $C$ , es la capacidad física del dispositivo, F  
 $C_1$ , es la capacidad equivalente de  $C_p$ , F  
 $C_2$ , es la capacidad equivalente de  $C_p$ , F

En el circuito equivalente (Fig.12), el voltaje de salida sin impedancia externa, se describe por la ecuación (26).

$$V_o = \lambda F \frac{C_p}{C_2} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 L_p C_p)^2 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}} \quad (26)$$

En dónde,

$\lambda$ , es el factor de conversión dimensional.

Sustituyendo  $L_p$ ,  $R_p$ ,  $C_p$ , se obtiene la expresión (27).

$$V_o = \frac{ke}{\epsilon A} \frac{1}{\sqrt{(s - \omega^2 m)^2 + \omega^2 r^2}} F \quad (27)$$

En dónde,

$V_o$ , es la tensión de salida, V  
 $e$ , es la distancia de separación de los electrodos, m  
 $\epsilon$ , es la permitividad dieléctrica, C/m  
 $A$ , es la superficie del material, m<sup>2</sup>  
 $s$ , es el coeficiente elástico, m<sup>2</sup>/N.  
 $\omega$ , es la correspondiente a frecuencia, Hz

m, es la masa del piezoelectrico, Kg  
r, es el coeficiente de rozamiento (viscosidad)  
F, es la fuerza aplicada, N

Finalmente la frecuencia del piezoelectrico (fo), está representada por la expresión (28).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{m}{s}}} F \quad (28)$$

### B. Conversión y conservación de energía en piezogeneradores.

En el harvesting de energía por transductores piezoelectricos PZT, se identifica 4 etapas: mecánica, conversión mecánica-eléctrica, conversión eléctrica-eléctrica, y, conservación eléctrica a carga.

#### Mecánica

Existen 2 tipos de entrada accionante: una fuerza estática, que genera un pulso de salida, y, una fuerza dinámica, de igual magnitud, que engendra un tren de pulsos. Frente a estas entradas accionantes, el transductor piezoelectrico se excita, reacción definida como esfuerzo o stress, y, que se explica a través de la expresión (29) [16], [22].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (29)$$

En dónde,

$\sigma$ , es el nivel de stress del material,  $\frac{N}{m^2}$   
F, es la fuerza aplicada sobre el material, N  
A, es el área del generador,  $m^2$

#### Conversión mecánica – eléctrica

Las entradas estáticas o dinámicas producen diferentes reacciones en un transductor piezoelectrico [22], [25]:

**Generación de carga eléctrica** entre las superficies, del material, definida por la expresión (30),

$$Q = Fd_{33} \quad (30)$$

En dónde,

Q, es la carga producida, C.  
F, es la fuerza aplicada, N.  
 $d_{33}$ , es la polarización inducida por unidad de esfuerzo aplicado en la dirección 3, C/N.

**Voltaje de salida**, en función de las constantes piezoelectricas, determinado por la expresión (31).

$$V = \frac{d_{33} d}{e_{33} e} F \quad (31)$$

En dónde,

V es el voltaje obtenido, V.

$d_{33}, e_{33}$  representan constantes piezoelectricas, C/N  
d, representa el grosor del piezoelectrico, m  
A, es el área del material piezogenerador,  $m^2$   
F, es la fuerza aplicada, N.

**Campo eléctrico**, potencialmente generable en magnitud, definido por la expresión (32) [2], [23].

$$E = g_{33}\sigma \quad (32)$$

En dónde,

E es el campo eléctrico generable, V/m  
 $g_{33}$ , es la constante de tensión piezoelectrica del material, Vm/ N  
 $\sigma$  es el nivel de stress ejercido al material,  $\frac{N}{m^2}$

Considerando las reacciones producidas en el piezoelectrico bajo influencia de las fuerzas de acción, el voltaje producido por el material se describe por la expresión (33) [2].

$$V = ETh_{layer} \quad (33)$$

En dónde:

V es el voltaje, V.  
E es el campo eléctrico generable, V/m  
 $Th_{layer}$ , es el espesor o grosor del material, m

En un sistema piezogenerador, sólo parte de la energía mecánica deforma el elemento, el resto se transforma en energía eléctrica.

#### Conversión eléctrica – eléctrica.

En los transductores piezoelectricos que actúan como mini generadores, la conversión eléctrica- eléctrica implica el uso eficaz de energía en corriente continua, para aplicaciones de bajo consumo energético.

#### Conservación eléctrica – almacenamiento de energía para carga.

La energía entregada por un sistema piezoelectrico, es transitoria y discontinua, tanto en AC como en DC.

Con condensador externo  $C_{ext}$ , el voltaje externo de los mini generadores piezoelectricos, se define por la ecuación (34) [2], [23].

$$V_{ext} = \frac{Q}{C_0 + C_{ext}} \quad (34)$$

En dónde,

Q es la carga, C  
 $C_0$  es la capacitancia interna del condensador, F  
 $V_{ext}$ , es el voltaje en el capacitor externo, V  
 $C_{ext}$ , es la capacitancia del capacitor externo, F

La energía almacenada en el capacitor externo, se define por la expresión (35) [2], [23].

$$E_{ext} = \frac{1}{2} C_{ext} \cdot V_{ext} \quad (35)$$

En dónde,

- $E_{ext}$ , es la potencia externa, J
- $V_{ext}$ , es el voltaje en el capacitor externo, V
- $C_{ext}$ , es la capacitancia del capacitor externo, F

V. PREDISEÑO DE UN SISTEMA PIEZOGENERADOR DE HARVESTING DE ENERGÍA BASADO EN TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS

La Fig. 13 muestra las etapas de funcionamiento de un sistema de harvesting de energía, basado en la utilización de transductores piezoeléctricos. La Fig. 14, presenta el diagrama de bloques propuesto del sistema.

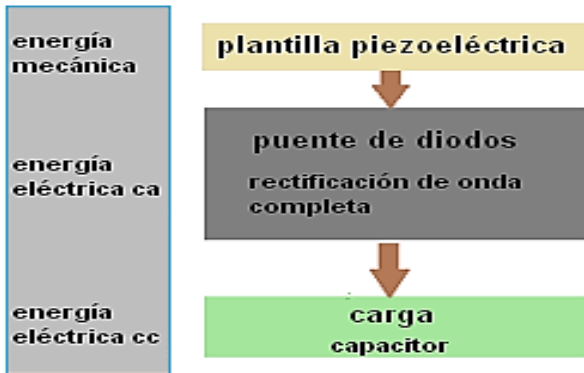


Fig. 13. Etapas del harvesting de energía en un sistema basado en transductores piezoeléctricos. Diseño de los autores

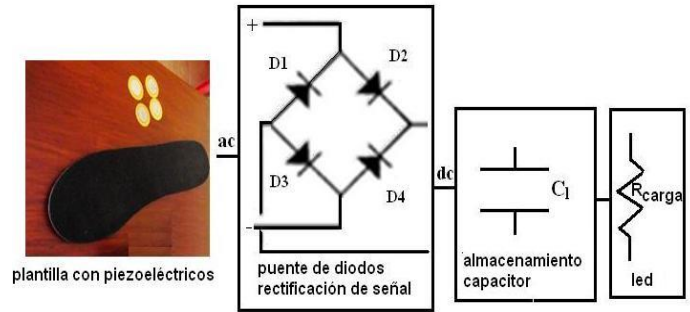


Fig. 14. Diagrama de bloques funcionales para el sistema a implementar. Diseño de los autores

La revisión bibliográfica muestra que al caminar, el esfuerzo se concentra en el talón y la punta del pie, un poco más en el talón que en la punta [5], [7].

La Fig. 15 muestra la apreciación inicial y funcional de la plantilla, estructurada con 2 capas, en la capa superior, 4 gomas semirrígidas se distribuyen uniformemente para ejercer presión sobre 4 cerámicas piezoeléctricas, ubicadas en la capa inferior.

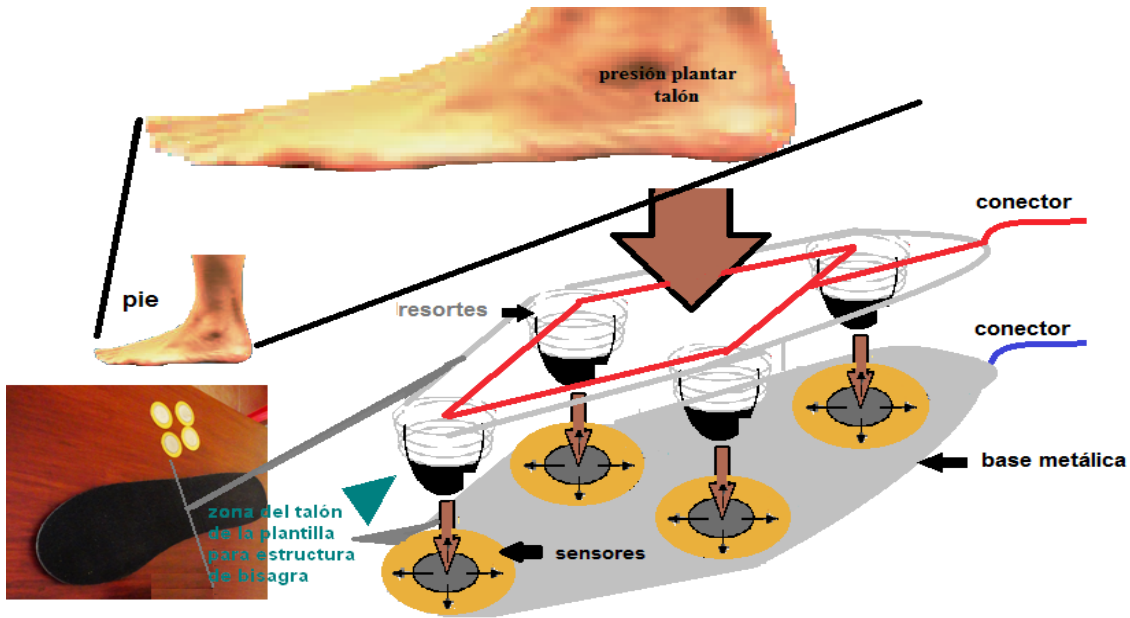


Fig. 15. Diseño de la plantilla piezoeléctrica a implementar en este proyecto. Diseño de los autores.

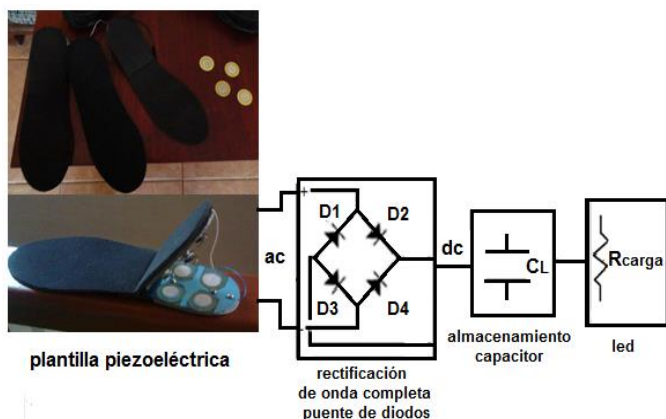
Al caminar, la presión directa sobre la plantilla, a través de las gomas deformará los piezoeléctricos en dirección

radial y perpendicular a la fuerza, obteniendo energía eléctrica de salida [14] [16].

## VI. INGENIERÍA DE DETALLE DEL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO PARA HARVESTING DE ENERGÍA EN EL CALZADO

### A. Arquitectura del sistema.

En base a las etapas de harvesting de energía a través del efecto piezoeléctrico, ya descritas, se implementó un sistema piezoeléctrico, estructurado de acuerdo a la arquitectura mostrada en la Fig. 1.



**Fig. 16.** Arquitectura propuesta para el sistema de harvesting de energía bajo efecto piezoeléctrico, a implementar. Diseño de los autores

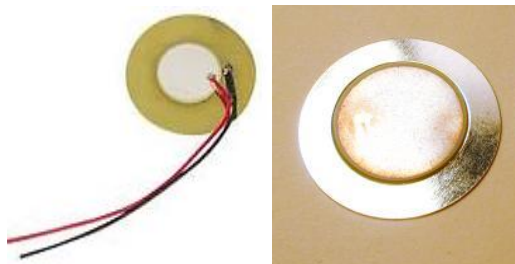
El sistema piezoeléctrico propuesto, contendrá 3 bloques funcionales: piezoeléctrico, almacenamiento, e, interfaz de usuario.

### B. Ingeniería de detalle del bloque piezoeléctrico.

#### Sobre el elemento piezoeléctrico a utilizar

Considerando la disponibilidad en el mercado local, se utilizó un *zumbador* (unimorph disk, o, disco de capa piezoeléctrica uniforme), empleado habitualmente para medir presión, aceleración, tensión o fuerza, y, muy común en varias aplicaciones de tweeter.

Un zumbador está formado por 2 chapas muy finas, de distintos metales, o, por una chapa de metal sobre la que se deposita una capa fina de cerámica o algún tipo de cristal. Cuando un zumbador se somete a presión, entre sus electrodos aparece una corriente eléctrica. Al ser alimentado con corriente eléctrica, el componente vibra, razón por la cual se conoce como zumbador [26] (ver Fig. 17).



**Fig. 17.** Vista frontal de un zumbador piezoeléctrico, [26], [27]

Un zumbador típico presenta gran flexibilidad mecánica, doblándose hacia arriba y hacia abajo, dentro de un límite de deflexión [28].

En el marco de este proyecto, el zumbador Cosson, elemento tipo 7BB-27-4, presenta las características técnicas de las Tablas 3 y 4 [29], [30].

**Tabla 3.**  
Especificaciones técnicas del material piezoeléctrico [29],

Porcentaje de voltaje (Vp-p)	20
Voltaje de operación (Vp-p)	1~30
Capacitancia (pf)	16000±30%
Temperatura de operación (°C)	-20~+60
Temperatura de almacenaje (°C)	-20~+70
Peso (g)	0.5

**Tabla 4.**

Especificaciones técnicas de los materiales piezoeléctricos [30]

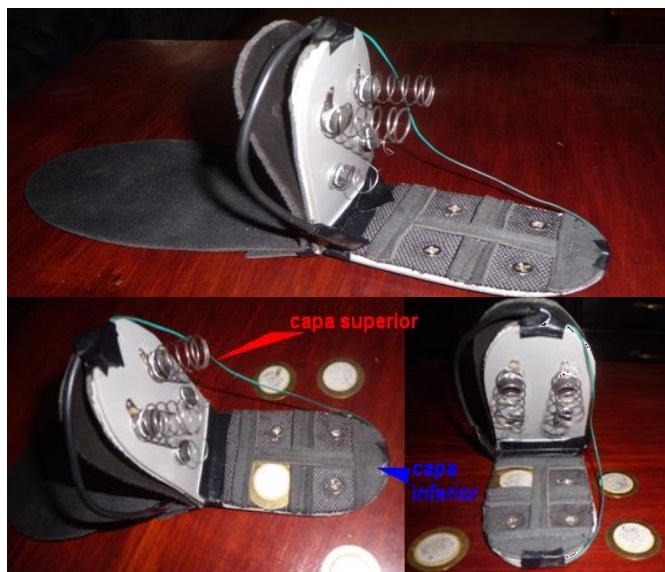
Tipo	7BB-27-4	7BB-27-4L0
Frecuencia de resonancia	4.6-0.5KHz	4.6-0.5KHz
Impedancia de resonancia	200max	300max
D1 (mm)	27	27
D2 placa (mm)	19.7	19.7
D3 (mm)	18.2	18.2
Espesor	0.54	0.54
Grosor placa	0.3	0.3
Tipo material	Latón	Latón

#### Sobre la plantillas piezoeléctricas a emplear

Para este proyecto, se decidió construir y evaluar el desempeño de 3 diferentes prototipos de plantillas piezoeléctricas, diferenciadas por el diseño de la base.

#### **Primer prototipo de plantilla piezoeléctrica**

El primer modelo, posee 2 capas en la zona del talón, unidas en bisagra en un extremo, y, libres por el otro (Fig.18).



**Fig. 18.** Implementación del prototipo I. Fotografía de los autores.

La capa inferior está formada por una base de plástico, recubierta con material de espuma de goma y tela, sobre la

que se colocan y sujetan 4 piezocélulas. 4 tornillos ubicados bajo las piezocélulas sirven como electrodos, y se cablean en paralelo entre sí, para conformar una primera salida piezoelectrica (ver Fig.19).

En la capa superior, también de plástico, sobresalen 4 gomas, distribuidas uniformemente, que al caminar ejercen presión sobre las piezocélulas. Cada goma se complementa con un resorte que actúa como electrodo. Los resortes se unen en paralelo, y conforman una segunda salida piezoelectrica (ver Fig.19).

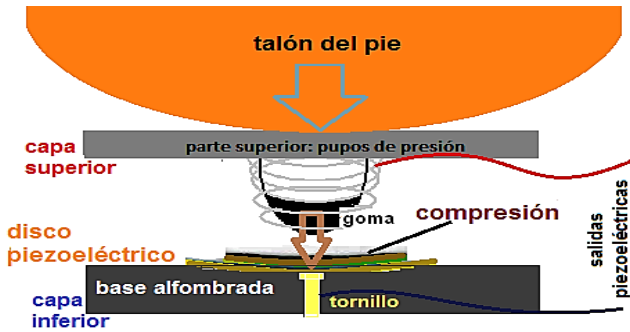


Fig. 19. Esquema de funcionamiento del prototipo I. Diseño de los autores.

### Segundo prototipo de plantilla piezoelectrica

El segundo prototipo de plantilla, posee una capa inferior diferente (ver Fig. 20).

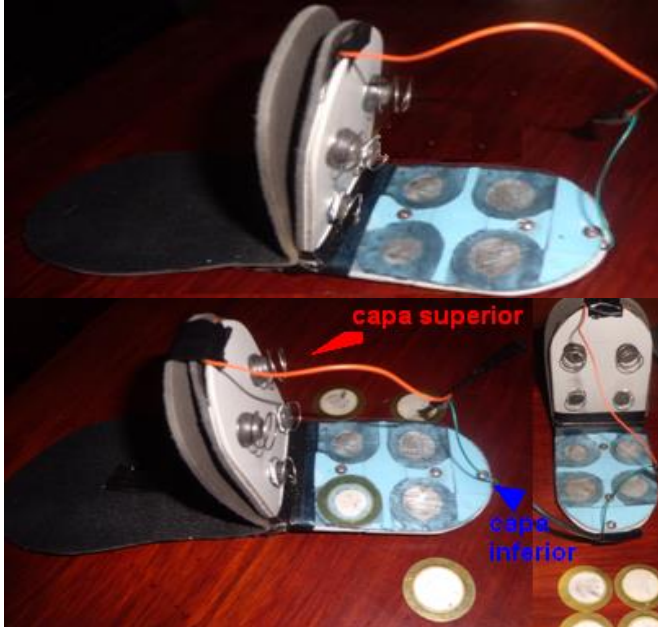


Fig. 20. Implementación del prototipo II. Fotografía de los autores.

La capa inferior, es una placa base de metal tool, material de buena capacidad de conducción eléctrica, plana y rígida, sobre la cual se coloca una cubierta plástica semitransparente. Sobre la placa, se sujeta 4 piezocélulas que interactúan con la placa metálica, que sirve de electrodo común (ver Fig.21)

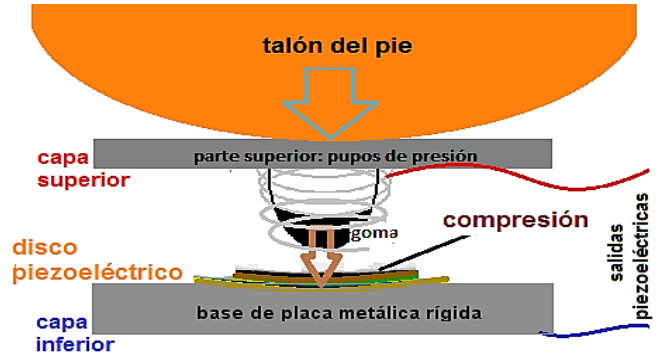


Fig. 21. Esquema de funcionamiento del prototipo II. Diseño de los autores.

### Tercer prototipo de plantilla piezoelectrica

El tercer prototipo de plantilla, posee una capa inferior semejante a la del segundo prototipo, con la salvedad de que la base metálica bajo las células esta perforada (ver Fig. 22).



Fig. 22. Implementación del prototipo III. Fotografía de los autores.

La perforación de la base metálica bajo las piezocélulas, permite la deflexión por profundidad al límite máximo (ver Fig. 23).

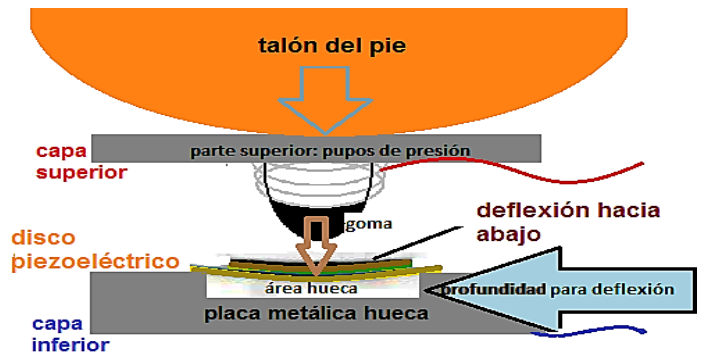


Fig. 23. Esquema de funcionamiento del prototipo III. Diseño de los autores.



### C. Ingeniería de detalle del bloque de almacenamiento o storage

A través de cualquiera de los prototipos para plantilla piezoeléctrica, se logra la conversión de energía inicial mecánico – eléctrica.

La conversión eléctrica – eléctrica, para harvesting, y, el storage de energía, se realizará a través del circuito mostrado en la Fig.24.

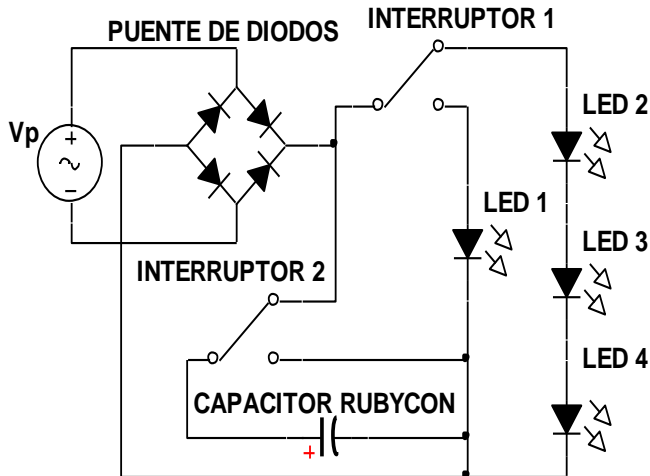


Fig.24. Diseño electrónico del bloque de almacenamiento y storage de energía. Autores.

El bloque propuesto, tiene una entrada de señales aleatorias, en AC, provenientes de la plantilla piezoeléctrica. ( $V_p$ ). Un puente de diodos a 2A, regula y convierte las señales piezoeléctricas a DC. Un capacitor de rápida carga y descarga, tipo RUBYCON, de 180uf 330V, realiza el storage de energía.

Para alimentar a la carga, en el bloque se contempla la instalación de un sócalo de 8 pines, que permite la conexión de LEDs y un multímetro. El circuito se complementa con 2 interruptores, que regulan el flujo de energía,

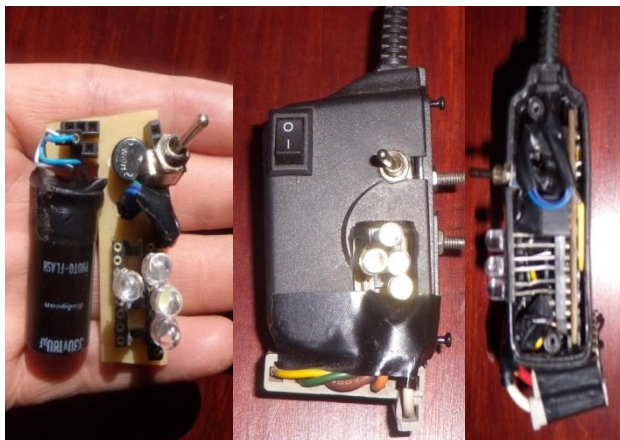


Fig. 25 Caja de adaptador que contiene circuito, rectificador de señal, y, capacitor de carga. Fotografía de los autores

### D. Sistema piezoeléctrico completo, interfaz para el usuario.

El sistema total, se concibe como un todo integrado que se ubica en el calzado, sin alterar mayormente la estética (ver Fig. 13).



Fig. 26. Integración de las plantillas piezoeléctricas, y, circuito de harvesting y storage. Fotografía de los autores.

## VII. ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS 3 PROTOTIPOS DE PLANTILLAS PIEZOELÉCTRICAS.

### A. Aproximación matemática de la potencialidad de generación

Una persona al caminar ejerce sobre el piso una fuerza equivalente a su peso, definida por la expresión (36) [2]:

$$F = mg \quad (36)$$

En dónde,

F es la fuerza aplicada sobre el piso, N  
m es la masa de la persona, Kg  
g es el valor de la gravedad, (9.8 m/s<sup>2</sup>)

Un individuo de 60 Kg de masa, ejercerá entonces una fuerza de 588 N sobre el piso, o sobre el material piezoeléctrico dispuesto sobre el piso.

En la etapa inicial de la piezogeneración (*etapa mecánica*), el nivel de stress del material piezoeléctrico, se define a través de ecuación (29), entonces, la fuerza ejercida por una persona de 60 Kg de masa, sobre un arreglo de 4 piezocélulas, en un área de 7mm de diámetro, provocará un stress o esfuerzo en el material, del orden de los 3819718,634 N/m<sup>2</sup>.

En la segunda etapa de la piezogeneración (*etapa mecánico-eléctrica*), se produce la conversión del esfuerzo mecánico en energía, a través de la creación de un campo eléctrico definido por la expresión (32) [2], [22], [31], [32]:

La Tabla 5, muestra las características técnicas más importantes de los cerámicos piezoeléctricos de mayor difusión en el mercado [31], [32], [33].

**Tabla 5**  
Características técnicas de los materiales piezoeléctricos comerciales

Material	PZT-4	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
$k_p$	0,60	0,61	0,60	0,63
$k_{33}$	0,68	0,70	0,71	0,73
$d_{33}(10^{-12}C/N)$	300	400	460	550
$d_{31}(10^{-12}C/N)$	-11,5	-170	-210	-265
$g_{33}(10^{-3}C/N)$	26	25	22	19
$g_{31}(10^{-3}C/N)$	-11	-11	-9	-9
$K_3^T$ (señal baja) C. dieléctrica relativa	1250	1750	2450	3100
Factor de disipación $\tan\delta$ (campo bajo)	0,004	0,020	0,020	0,020
Densidad $Kg/m^3$	7600	7650	7500	7500
Temp. Curie ( $^{\circ}C$ )	325	360	260	190
Factor de calidad	500	75	70	65
$Q_m$				
$s^E_{11}(10^{-12}m^2/N)$	12	19	23	21
$s^E_{33}(10^{-12}m^2/N)$	16	16	16	15
$s^D_{11}(10^{-12}m^2/N)$		14,6-13,0-13,9		
$s^D_{33}(10^{-12}m^2/N)$		9,6-7,7-8,8		
$N_p$ (Hz-m) modo planar	2200	1950	2000	1950
$N_t$ (Hz-m) modo espesor	1905	1800	1950	2000

Considerando los datos de la Tabla 1, el campo eléctrico generable en cerámicos tipo PZT-4, alcanza los 99312, 684 V/m. Para cerámicos tipo PZT-5, el campo será del orden de los 72574, 654 V/m.

Entonces el voltaje de salida del material piezoeléctrico relacionado con el campo eléctrico generable, de la expresión (33), para cerámicos tipo PZT-4, estará en el orden de 23,835 V, mientras que para materiales tipo PZT-5, el voltaje esperado será de 17,418 V.

Los valores de voltaje de salida calculados analíticamente, son semejantes a los declarados en la ficha técnica del fabricante de los zumbadores, que hace referencia a 20 V [29].

Adicionalmente al voltaje de salida, en el proceso de piezogeneración también se obtiene una carga básica, cuyo valor se calcula a través de la expresión (30) [2], [31], [32], [33]:

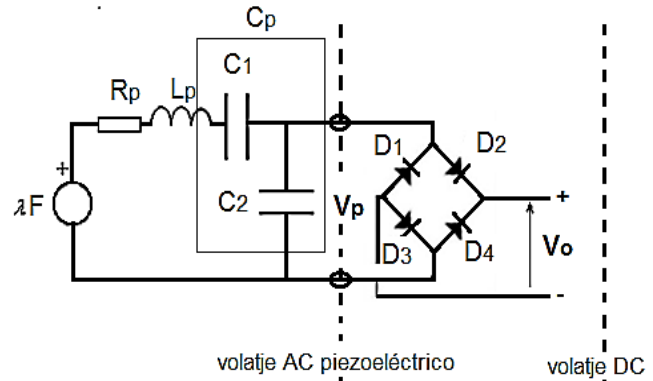
Para cerámicos PZT-5, la carga básica será del orden de los 323,4 nC.

Al representar la piezogeneración con un circuito equivalente [2] (ver Fig.1), para el circuito equivalente abierto, el voltaje de salida se relaciona con la carga básica, a través de la ecuación (37):

$$V_{ext} = \frac{Q}{C_t} - V_D \quad (37)$$

En dónde,

- Q es la carga, C
- $V_{ext}$ , es el voltaje externo, V
- $C_t$ , es la capacitancia total, capacitancia interna del piezoeléctrico ( $C_0$ ), y capacitancia externa ( $C_{ext}$ ), F
- $V_D$ , es el voltaje en el diodo del circuito equivalente, V



**Fig.27.** Circuito equivalente del proceso de piezogeneración

Sin capacitor externo, y, considerando una capacitancia nula en los cables, el voltaje externo de los materiales tipo PZT-5, se calcula en 20,7 V.

En la tercera etapa de la piezogeneración (*etapa eléctrica – eléctrica*), se produce la conversión de energía del formato AC a DC [24]. Entonces, para una rectificación de onda completa, el voltaje rectificado se aproxima por la expresión (38):

$$V_{dc} = 0.636 * V_m \quad (38)$$

En dónde:

- $V_{dc}$ , es el voltaje continuo de onda completa, V
- $V_m$ , es el voltaje alterno, V

Para el material PZT-5, el voltaje rectificado estaría en el orden de 13,2V.

### B. Preparativos para pruebas de campo, simulación.

Previo a la realización de pruebas de campo, se decidió evaluar el funcionamiento del circuito eléctrico de las plantillas piezoeléctricas en una simulación, utilizando los recursos de la aplicación Multisim.

Empleando el circuito de la Fig. 24, se simula. La Fig. 28, muestra los resultados obtenidos al alimentar los 2 arreglos de la carga (1 LED, y, 3 LEDs): la señal piezoeléctrica de entrada corresponde a una señal sinusoidal AC, con valores pico de 20 V; operando con la carga de 3 LEDs, el voltaje rectificado alcanza valores de 9,35 V; mientras que, para un solo LED de carga, el voltaje rectificado es del orden de los 2,68 V.

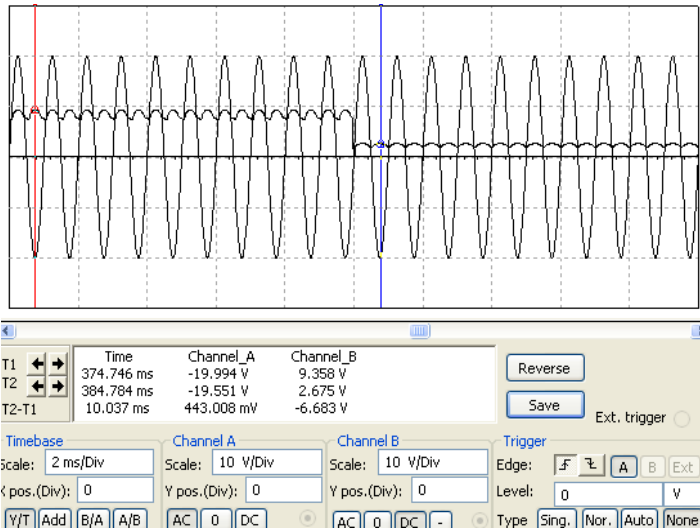


Fig. 28. Resultados obtenidos en la simulación del circuito electrónico de las plantillas piezoeléctricas

### C. Pruebas de campo

Todas las plantillas piezoeléctricas comparten el mismo circuito electrónico, y, se diferencia en la forma en que se excitan las piezocélulas. Utilizando como carga LEDs de 2,1 a 3,6 V, de 20mA [34], el circuito ha sido diseñado de tal forma que, al caminar se excite el sistema piezoeléctrico, se genere energía, y se almacene en el capacitor. La carga se activa, cuando en los electrodos del capacitor se alcance el voltaje mínimo requerido por los arreglos de LED. Las plantillas piezoeléctricas se sometieron a 3 pruebas.

#### Resultados obtenidos en la primera prueba

Para determinar la forma de la señal entregada por la plantilla, y, aproximar la potencia generada, por facilidad, se utilizó la segunda plantilla piezoeléctrica.

En un *primer experimento*, la plantilla se excitó manualmente, mientras el circuito alimentaba una carga de un solo LED. En un osciloscopio, con una escala de 1 ms por división en el eje (x), y, una de 1 V por división en el eje (y), se observó la señal mostrada en la Fig. 29. La señal alcanzó un valor de 2, 3 V aproximadamente.



Fig. 29. Señal de salida de la segunda plantilla piezoeléctrica, ante una excitación manual constante, y, una carga de un solo LED. Fotografía tomada por los autores

En un *segundo experimento*, la plantilla se excitó por un caminante. Para una escala de 20ms por división, y, 1V por división, se obtuvo el choque del talón que provoca un pulso inverso en la señal.

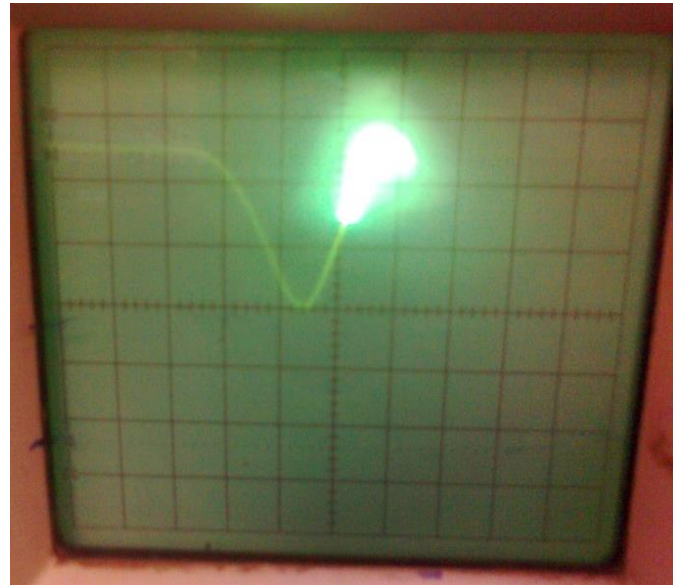


Fig. 30. Señal de salida de la segunda plantilla piezoeléctrica, ante una excitación por un caminante, y, una carga de un solo LED. Fotografía tomada por los autores

En un *tercer experimento*, se intentó aproximar la potencia generada por la plantilla piezoeléctrica. Una vez cargado el capacitor del circuito, se conecta la carga. En base a la observación, se registró el valor inicial y final del voltaje proporcionado a la carga, donde la intensidad luminosa del LED se mantiene invariante, y, el amperaje que circula por la rama. La Tabla 6, muestra los resultados obtenidos al alimentar un solo LED.

Tabla 6

Potencia generada en la segunda plantilla piezoeléctrica, durante la alimentación de un solo LED de carga. Elaboración de los autores.

Prueba	Peso del caminante, Kg	Valores iniciales y finales de voltaje en la carga, V	Corriente en la rama, uA	Potencia generada, uW
1	46	2.52-2.49	28.0	70.1400
2	47		25.2	63.1260
3	48		20.1	50.3505
4	57		26.7	66.8835
5	58		26.4	66.1320

#### Resultados obtenidos en la segunda prueba

Con la panorámica general del equipamiento empleado para evaluar el desempeño de cada una de las 3 plantillas piezoeléctricas diseñadas, al alimentar un único LED de carga, Fig. 31. Para diferentes pesos del caminante, mediante un cronómetro se determinó el tiempo  $t$  requerido para que el condensador alcance el voltaje mínimo requerido por la carga, registrando el número de pasos efectuados para alcanzar este objetivo, y, midiendo el voltaje entregado a la carga.



**Fig. 31.** Vista general del equipamiento utilizado para evaluar el desempeño de las plantillas piezoeléctricas alimentando un único LED. Fotografía tomada por los autores

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos al experimentar con la primera plantilla piezoeléctrica, en la que las piezocélulas se excitan sobre una superficie semiflexible. Durante la ejecución de las pruebas, se detectó problemas con el diseño mecánico del segmento de excitación, razón por la cual la evaluación pudo ser completada sólo para 2 caminantes.

**Tabla 7**

Desempeño de la primera plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga. Diseño de los autores

Prueba	Peso del caminante, Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
1	46	-	-	-
2	47	-	-	-
3	48	35,02	2,49	30
4	57	-	-	-
5	58	33,02	2,49	26

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos para la segunda plantilla. El uso de una base metálica rígida y de gran conductividad, sobre la que se excitan las células piezoeléctricas, redujo el tiempo necesario para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga.

Al experimentar con el tercer prototipo, que incluye una base metálica perforada para facilitar la deflexión de las piezocélulas, se registró la destrucción mecánica de los elementos, para perforaciones de más de 1 mm de profundidad (ver Fig. 32). El problema presentado se solucionó al reducir la profundidad de las perforaciones a menos de 1 mm. La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos entonces. Una mayor deflexión de las piezocélulas, permite alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en un intervalo de tiempo más corto, aunque siempre existirá la

limitante de la deflexión máxima soportada por las piezocélulas.

**Tabla 8**

Desempeño de la segunda plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga. Diseño de los autores

Prueba	Peso del caminante, Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
1	46	30.05	2.50	25
2	47	29.16	2.51	23
3	48	27.57	2.50	22
4	57	24.68	2.51	20
5	58	23.93	2.49	19



**Fig. 32.** Destrucción mecánica de las piezocélulas al experimentar el tercer prototipo con perforaciones de más de 1mm de profundidad. Fotografía de los autores

**Tabla 9**

Desempeño de la tercera plantilla piezoeléctrica al alimentar un único LED de carga. Diseño de los autores

Prueba	Peso del caminante, Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
1	46	15.80	2.50	12
2	47	15.30	2.49	11
3	48	15.03	2.51	11
4	57	14.25	2.51	10
5	58	13.49	2.49	10

La Tabla 10 resume los resultados para las 3 plantillas investigadas. La mejor performance se obtuvo para la plantilla que emplea material perforado para la deflexión de las piezocélulas. La Fig. 33 muestra el comportamiento de cada plantilla para diversos pesos del caminante.

**Tabla 10**

Desempeño de las plantillas piezoeléctricas al alimentar un único LED de carga. Diseño de los autores

#	Peso del caminante, Kg	Voltaje mínimo requerido por la carga, V	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en el primer prototipo, s	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en el segundo prototipo, s	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga en el tercer prototipo, s
1	46	2.49-2.51		30.05	15.80
2	47			29.16	15.30
3	48		35,02	27.57	15.03
4	57		-	24.68	14.25
5	58		33.02	23.93	13.49

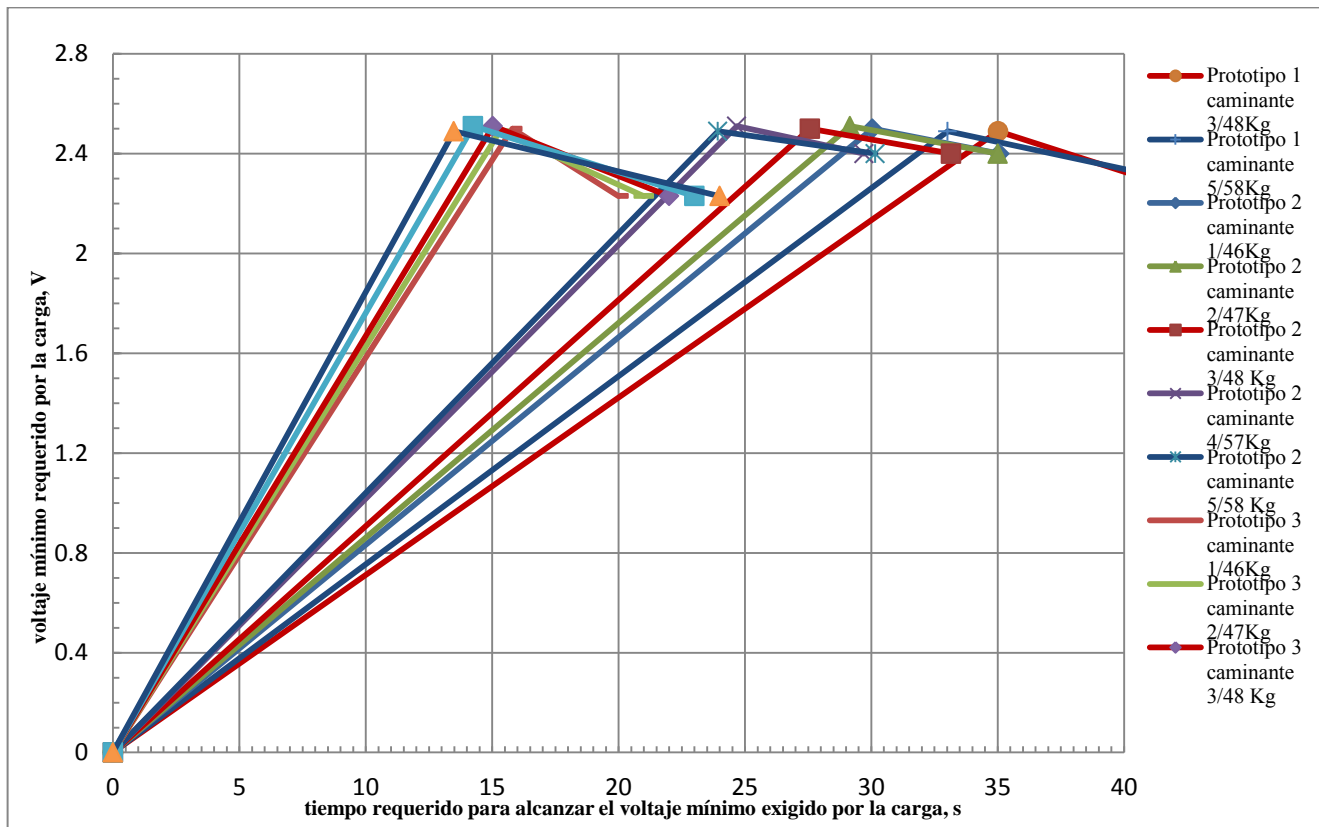


Fig. 33 Comportamiento de las plantillas para diversos pesos del caminante. Elaborado por los autores

Resultados obtenidos en la tercera prueba

Los resultados obtenidos en la segunda prueba, permitieron seleccionar como prototipo óptimo al que, utiliza material perforado para la deflexión de las piezocélulas. Este prototipo se sometió entonces a la prueba, en la que se alimentó una carga conformada por 3 LEDs conectados en serie, cuya metodología de experimento fue la misma de las anteriores (ver Fig.34). La Tabla 11, muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 11**

Desempeño del tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica al alimentar una carga de 3 LEDs conectados en serie. Diseño de los autores

Prueba	Peso del caminante, Kg	t requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga, s	Voltaje entregado a la carga, V	Número de pasos requeridos para alcanzar el voltaje mínimo exigido por la carga
4	57	44.28	6.52-6.55	32



Fig. 34. Vista general del equipamiento utilizado para evaluar el desempeño del tercer prototipo de plantilla piezoeléctrica, alimentando una carga de 3 LEDs conectados en serie. Fotografía tomada por los autores

VIII. CONCLUSIONES

- En 1995, los laboratorios de investigación sobre cosecha de energía residual del MIT, llegaron a la conclusión de que del choque del talón era factible obtener energía.
- Actualmente, se puede encontrar en el mercado diferentes aplicaciones que utilizan el efecto piezoeléctrico para capturar energía a través del calzado, y, que proveen de energía a cargas de bajo consumo como baterías, lámparas, y, otras.
- Con la intención de concentrar las fuerzas de acción y reacción, facilitando la contracción y la elongación del material piezoeléctrico ubicado en el calzado, se utilizan plantillas piezoeléctricas.
- La revisión bibliográfica muestra que, los cerámicos y los polímeros son los piezoeléctricos preferidos al momento de diseñar plantillas para potenciar el harvesting de micro energía.

- Los resultados obtenidos en pruebas efectuadas con plantillas PVDF y PZT, en condiciones similares, muestran un mejor desempeño de la plantilla PZT.
- El uso de diferente tipo de calzado, modifica el sistema de fuerzas de reacción en contraposición a la marcha humana. La mejor performance en un piezoeléctrico se logra en calzado de horma flexible, por cuanto una mayor deformación, y, una pronta recuperación de la forma original, facilitan la generación de un mayor tren de pulsos de energía
- En el harvesting de energía en transductores piezoeléctricos PZT, se identifica 4 etapas: mecánica, mecánica-eléctrica, conversión eléctrica-eléctrica, y, conservación eléctrica a carga.
- El sistema piezoeléctrico propuesto para harvesting de energía a través del calzado, contiene 3 bloques funcionales: el piezoeléctrico, el de almacenamiento, y, el de interfaz de usuario.
- En cualquier sistema piezoeléctrico, el elemento piezoeléctrico utilizado es el componente principal. Considerando su disponibilidad en el mercado local, el elemento utilizado en este proyecto es un zumbador (unimorph disk, o, disco de capa piezoeléctrica uniforme).
- Para este proyecto, se decidió, diseñar y probar 3 diferentes prototipos de plantillas piezoeléctricas, diferenciadas por las características técnicas de la base.
- Las pruebas preliminares, mostraron que el tercer prototipo presenta los mejores resultados de desempeño.
- La conversión eléctrica – eléctrica, para harvesting, y, el storage de energía, se realizó a través de un circuito, que consta de; Una entrada de señales aleatorias, en AC, provenientes de la plantilla piezoeléctrica. Un puente de diodos a 2 A, que regula y convierte las señales piezoeléctricas a DC. Un capacitor de rápida carga y descarga, tipo RUBYCON, de 180uf 330V, que realiza el storage de energía.
- Para alimentar a la carga, en el circuito de conversión y storage, se contempla la instalación de un sócalo de 8 pines, que permite la conexión de LEDs y multímetro.
- La descripción analítica de la piezogeneración, permite aproximar los procesos mecánicos y eléctricos, y, calculando con relativa exactitud el nivel máximo de voltaje que se puede alcanzar para un material piezoeléctrico dado.
- Para cada una de las plantillas piezoeléctricas construidas, se obtuvo diferentes series de peso del caminante vs tiempo requerido para alcanzar el voltaje mínimo requerido por la carga. Especial atención merece el hecho de que a mayor peso del caminante, el tiempo requerido sea menor.
- El mejor desempeño se observó en la plantilla en la cual, las células piezoeléctricas son sometidas a deflexión. Sin embargo, los límites de desempeño

están relacionados al límite de deflexión del material piezoeléctrico, tal como se demostró con destrucción mecánica de las piezocélulas, ocurrido durante la experimentación.

## IX. REFERENCIAS

- [46] SHENCK, Nathan S. “A Demonstration of useful electric Energy generation from Pizoceramics in a shoe”, sitio web “A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezceramics” documento [en línea]. Entrada 24 de septiembre del 2012. Consultado 2012-10-10. URL:<http://ftp.it.murdoch.edu.au/units/ICT219/Papers%20for%20transfer/Nate-Thesis-Final.pdf>
- [47] GONZÁLEZ, Sandra. JARAMILLO Jorge Luis. “Metodología de diseño de un generador piezoeléctrico para harvesting de energía”, sitio web “Quasar 0360-7912” paper [en línea]. Entrada 24 de septiembre del 2012. Consultado 2012-10-10. URL: <http://es.scribd.com/doc/106829336/Metodologia-de-diseño-de-un-generador-piezoeléctrico>
- [48] “CENIDET”, [en línea], consultado 2012-11-16, URL: [http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis\\_mc/128MC\\_avb.pdf](http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis_mc/128MC_avb.pdf)
- [49] MERINO, V. JARAMILLO, J. “Una aproximación a la naturaleza de la piezoelectricidad”, sitio web “Quasar 0360-7912”, paper en [línea], entrada noviembre 7 del 2012, consultado 2012-12-13 URL: <http://es.scribd.com/doc/112499018/naturaleza-de-la-piezoelectricidad>
- [50] MERINO, V. JARAMILLO, J. “Utilización de baldosas piezoeléctricas para harvesting de energía”, documento word entregado por autores de paper.
- [51] MERINO, V. JARAMILLO, J. “Caracterización del desempeño de baldosas piezoeléctricas PowerLeap”, documento word entregado por autores de paper.
- [52] MORENO, J. C. FERNANDEZ, J. F. OCHOA, P. CERES, R. CALDERON, L. RONCON, E. PONS, J. L. “Aplicación de sensores piezoeléctricos cerámicos a la caracterización biomecánica, [en línea] consultado 2013-03-04, URL: <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fceramicayvidrio.revistas.csic.es%2Findex.php%2Fceramicayvidrio%2Farticle%2Fdownload%2F473%2F493&ei=N0s-UZCaDIyN0QHj7YGIDA&usq=AFQjCNG12-4owGzVqzLrUXZK6hbRFHFk6w>
- [53] “Estudio del patrón de presiones plantares”, sitio web [en línea], consultado 2013-03-02, URL: [http://clinicadelpieembajadores.com/estudio\\_del\\_patron\\_de\\_%20presiones\\_plantares\\_en\\_pies\\_con\\_hallux\\_valgus\\_mediante\\_un\\_sistema\\_de\\_plantillas\\_instrumentalizadas.pdf](http://clinicadelpieembajadores.com/estudio_del_patron_de_%20presiones_plantares_en_pies_con_hallux_valgus_mediante_un_sistema_de_plantillas_instrumentalizadas.pdf)
- [54] LEOPOLDO, F. YABAR, E. DANIEL, O. CARCIA, R. CONDOR, Cristian. VILLAVICENCIO, Emilio. “estudio para el diseño de un Sistema Baropodométrico Electrónico” [en línea. Consultado 2013-04-26. URL: <http://www.bioingenieria.edu.ar/grupos/geic/biblioteca/archivos/Trabyres/T08TCPe07.pdf>
- [55] PARADISO, Joe. KENDALL, Jake. KYMISSIS, John. SHENCK, Nate. “Parasitic Power Harvesting in Shoes”,

- [en línea], Consultado 2012-12-25. URL:<http://resenv.media.mit.edu/power/index.html>
- [56] Biomecánica: una mirada al funcionamiento de nuestro cuerpo, [Online]. Disponible en: [http://octi.guanajuato.gob.mx/octigto/formularios/ideasConcyteg/Archivos/21022007\\_BIOMECANICA\\_MIRADA\\_CENTRO\\_NUESTRO\\_CUERPO.pdf](http://octi.guanajuato.gob.mx/octigto/formularios/ideasConcyteg/Archivos/21022007_BIOMECANICA_MIRADA_CENTRO_NUESTRO_CUERPO.pdf) [Consulta: Agosto 2012]
- [57] “Recolección de energías ambientales mediante materiales cerámicos y mono cristales”, sitio web, “CIDIDI centro de investigación, innovación y diseño de ingeniería”, [en línea]. Consultado 2012-10-15, URL: [http://laboratorios.fi.uba.ar/cididi/webcididi/notastecnicas\\_pdf/lic\\_juarez1.pdf](http://laboratorios.fi.uba.ar/cididi/webcididi/notastecnicas_pdf/lic_juarez1.pdf)
- [58] “Cerámica piezoeléctrica” [en línea] consultado 2013-04-04 URL: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cer%C3%A1mica\\_piezoel%C3%A9ctrica](http://es.wikipedia.org/wiki/Cer%C3%A1mica_piezoel%C3%A9ctrica)
- [59] “Energy harvesting con tecnología piezoeléctrica”, sitio web “Energy harvesting con tecnología piezoeléctrica | Zigbee labs” [en línea]. Entrada 2 Sep. 2010. Consultado 2012-10-12. URL: <http://www.zigbe.net/archivos/441>
- [60] KENDALL, Clyde Jake. “Parasitic Power Harvesting in Shoe Mounted Devices”, [en línea], Consultado 2012-12-25. URL:<http://resenv.media.mit.edu/power/index.html>
- [61] PERÉZ, Miguel. ÁLVAREZ, Juan. CAMPO, Juan. FERRERO, Fco Javier. GRILLO, Gustavo. “INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA”, Editorial THOMSON. 2004
- [62] GONZÁLEZ, René. “Diseño y Caracterización mediante el método de los elementos finitos de un transductor ultrasónico para aplicaciones médicas”, Tesis [en línea]. Consultado: 2013-06-21. URL: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/290/Tesis.pdf?sequence=1>
- [63] PREIDIKMAN, Sergio. MASSA, Julio. BANDA, María. “Accionamiento mediante actuadores piezoeléctricos de alas flexibles para micro-vehículos aéreos” paper, sitio web [en línea]. Entrada noviembre 2006. Consultado 2013-03-04. URL: <http://www.amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/616/586%20rel=&>
- [64] “Sensores piezoeléctricos”, sitio web [en línea], consultado 2012-10-10, URL: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040003/lecciones/cap3lecc8.htm>
- [65] “Cuál es un transductor piezoeléctrico”, sitio web, “¿Cuál es un transductor piezoeléctrico?”, [en línea]. Consultado 2012-11-11. URL: <http://web63.justhost.com/~xentrop1/Cu%C3%A1l-es-un-transductor-piezoel%C3%A9ctrico.php>
- [66] “Sensores de presión” sitio web, “Sensores de presión- parte I” [en línea]. Consultado 2012-10-12. URL: [http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080306-Sensores-parte\\_III.presion.pdf](http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080306-Sensores-parte_III.presion.pdf)
- [67] COSÍN, ANDRADAS, David. “Diseño y desarrollo de un sensor basado en materiales piezoeléctricos”, sitio web [en línea], consultado 2013-05-22. URL: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/449a920b36434.pdf>
- [68] GRETARSSON, Dagur. “Energy Harvesting using Piezoelectric Generators”, February 7, 2007
- [69] BOYLESTAD, Robert. NASHELSKY, Louis. “ELECTRÓNICA: TEORÍA DE CIRCUITOS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS”, octava edición 2003.
- [70] “Adquisición de datos y procesamiento de señales”, [en línea], consultado 2012-11-21, URL: <http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/73/11/Capitulo3.pdf>
- [71] “Características del zumbador”, artículo [en línea], URL: <http://www.ceiarteuntref.edu.ar/badarte/node/138>
- [72] “Que es un piezoeléctrico Zumbador”, consultado 2012-11-05, artículo [en línea], URL: <http://www.comohacerunabateriaelectronica.com/construirunkitpaopaso/lospiezoelctricos/quesunpiezoelctrico-164.html>
- [73] “Piezo tweeter application note”, sitio web, Pulsar Development ltd, artículo [en línea], consultado 2013-01-25, URL: <http://www.pulsardevelopments.com/products/detail/piezoean.html>
- [74] “Datos técnicos del zumbador”, artículo [en línea], URL: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/20mm-piezo-ceramic-element-543962117.html>
- [75] Hoja de datos de CEB27D44, [en línea], consultado 2013-08-01, URL: <http://www.cui.com/product/resource/ceb-27d44.pdf>
- [76] ALVES, PEREIRA, Antonio Henrique. “Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades”, sitio web, Cerámicas piezoeléctricas- ATCP Engenharia física, pdf [en línea], consultado 2013-07-23. URL: <http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/RT-ATCP-01-%5BES%5D.pdf>
- [77] “CUI INC” descripción del piezoeléctrico <http://www.cui.com/product/resource/ceb-27d44.pdf>
- [78] “PZT5A & 5H Materials Technical Data (Typical Values), hoja de datos [en línea], consultado 2013-07-23. URL: <http://www.datasheetarchive.com/PZT5A-datasheet.html>
- [79] “Características de un led de luz brillante”, en línea, URL: <http://dled.com.ar/led-8mm-amarillo>