



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

**TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**Análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la  
utilización de baldosas piezoeléctricas**

**Trabajo de fin de titulación**

**AUTOR:** Merino Alvarado Vicente Andrés

**DIRECTOR:** Jaramillo Pacheco Jorge Luis, Ing.

**Loja-Ecuador 2013**



## CERTIFICACIÓN: ACEPTACIÓN DE PROYECTO DE FIN DE TITULACIÓN

Loja, Enero de 2013

Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco  
Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones

Dejo constancia de haber revisado y estar de acuerdo con el proyecto de fin de titulación, titulado: "Análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la utilización de baldosas piezoeléctricas".

Presentado por:  
Vicente Andrés Merino Alvarado

Particular que comunico para los fines legales pertinentes.

---

Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco

Visto Bueno Dirección Escuela

F).....  
Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco  
DIRECTOR DE LA TITULACIÓN DE ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

Enero de 2013



## ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS EN TESIS DE GRADO

Yo, Vicente Andrés Merino Alvarado, declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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”

---

Vicente Andrés Merino Alvarado

1104675473



## AUTORÍA

Las ideas, opiniones, conclusiones, y contenidos expuestos en el presente informe de investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Vicente Andrés Merino Alvarado



## DEDICATORIA

A Dios por brindarme la sabiduría y fortaleza para no desmayar. A mis padres y hermana, quienes con sus valores, su amor, su ejemplo, su unión y su apoyo me han guiado para ser un buen hijo y una persona de bien.

A mi abuelo, por su ejemplo de perseverancia, de rectitud, de bondad e igualdad.

Y a mis amigos, por su muestra de amistad y lealtad.



## **AGRADECIMIENTO**

Extiendo mi agradecimiento a los docentes de la titulación de electrónica y telecomunicaciones de la UTPL, quienes impartieron sus conocimientos y sus experiencias profesionales, especialmente al Ing. Jorge Luis Jaramillo quien me guío y asesoró durante la realización de este proyecto

Agradezco a Dios por la sabiduría que me brinda para saber tomar decisiones, y por la fortaleza para seguir adelante. Agradezco a mis padres, por su esfuerzo y confianza que me ofrecen, y, por último agradezco a mis amigos por las lecciones de vida que juntos aprendemos.

**Vicente Andrés Merino Alvarado**



## ÍNDICE O CONTENIDO

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS EN TESIS DE GRADO.....	II
AUTORÍA .....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN .....	13
OBJETIVOS.....	14
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>15</b>
<b>UNA APROXIMACIÓN A LA NATURALEZA DE LA PIEZOELECTRICIDAD .....</b>	<b>15</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	15
1.2 PIEZOELECTRICIDAD .....	15
1.2.1 Efecto piezoeléctrico .....	15
1.2.2 Constantes piezoeléctricas.....	17
1.2.2.1 Constante de carga piezoeléctrica $d_{ij}$ .....	18
1.2.2.2 Constante de tensión piezoeléctrica $g_{ij}$ .....	19
1.2.2.3 Constante de acoplamiento $k_{ij}$ .....	20
1.2.2.4 Constante de conformidad o compliancia elástica $s_{ij}$ .....	20
1.2.2.5 Constantes dieléctricas $K_{ij}$ .....	20
1.2.3 Otras magnitudes de las propiedades piezoeléctricas .....	21
1.2.3.1 Factor de calidad mecánico $Q$ .....	21
1.2.3.2 Factor de disipación dieléctrica $\tan \delta$ .....	21
1.2.3.3 Temperatura de Curie.....	21
1.2.4 Histéresis dieléctrica .....	21
1.2.5 Clasificación de los materiales piezoeléctricos.....	22
1.2.5.1 Materiales tipo hard .....	23
1.2.5.2 Materiales tipo soft .....	23
1.2.6 Limitaciones de los materiales piezoeléctricos .....	25
1.2.6.1 Envejecimiento .....	25
1.2.6.2 Variabilidad de las propiedades piezoeléctricas en función de la temperatura .....	25
1.2.6.3 Límite de excitación eléctrico y mecánico .....	26
1.3 PIEZOGENERADORES.....	26
1.3.1 Piezogeneradores de una capa .....	26
1.3.2 Piezogeneradores de múltiples capas.....	27
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>30</b>
<b>ESTÁNDARES VIGENTES EN LA INDUSTRIA DE MATERIALES PIEZOELECTRICOS .....</b>	<b>30</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	30
2.2 ESTÁNDARES DESARROLLADOS POR EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION CENELEC PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELECTRICOS .....	30



2.2.1	EN 50324-1:2002 propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos y sus componentes - Parte 1: Definiciones y clasificaciones.....	30
2.2.2	EN 50324-2:2002 Propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos y sus componentes - Parte 2: Métodos de medición y propiedades de baja potencia .....	31
2.2.3	EN 50324-3:2002 Propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos y sus componentes - Parte 3: Métodos de medición de alta potencia .....	31
2.2.4	prEN 50ZZZ-1 (BTTF 63-2 (CONV) 12) Propiedades de actuadores de múltiples capas - Parte 1: Términos y definiciones.....	31
2.2.5	prEN 50ZZZ-2 (BTTF 63-2 (CONV) 12) Propiedades de actuadores de múltiples capas - Parte 2: Métodos de medición.....	32
2.2.6	prEN 50PPP (BTTF 63-2 (CONV) 12) Propiedades de películas gruesas piezoeléctricas .....	32
2.3	ESTÁNDARES DESARROLLADOS POR INTERNATIONAL COMMISSION ELECTROTECHNICAL IEC PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.....	32
2.4	ESTÁNDARES DESARROLLADOS POR ULTRASONIC, FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL SOCIETY OF THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS IEEE-UFFC PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS .....	34
2.5	OTROS ESTÁNDARES DESARROLLADOS PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS	34
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>		<b>36</b>
<b>UTILIZACIÓN DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA.....</b>		<b>36</b>
3.1	INTRODUCCIÓN .....	36
3.2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS.....	36
3.3	CINESIOLOGÍA DE LA MARCHA HUMANA .....	38
3.3.1	El ciclo de la marcha .....	38
3.3.2	Biomecánica de la marcha.....	40
3.3.2.1	Una persona de pie.....	40
3.3.2.2	Una persona caminando.....	41
3.3.2.3	Fuerzas de reacción .....	41
3.3.2.4	Presión plantar .....	43
3.4	HARVESTING DE ENERGÍA DE LA MARCHA A TRAVÉS DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS .....	43
3.4.1	Generador piezoeléctrico.....	43
3.4.2	Rectificador.....	43
3.4.3	Carga.....	44
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>		<b>46</b>
<b>OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE UNA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP .....</b>		<b>46</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	46
4.2	DESCRIPCIÓN DE UNA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP .....	46
4.3	OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP .....	48
4.3.1	Condiciones para la obtención de la característica.....	48
4.3.2	Instrumentación utilizada .....	49
4.3.3	Resultados preliminares.....	50



4.4	ANÁLISIS DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP	52
4.4.1	<i>Primer sector de la característica de trabajo: el talón hace contacto con la baldosa</i>	52
4.4.2	<i>Segundo sector de la característica de trabajo: apoyo plantar y medio sobre la baldosa</i>	53
4.4.3	<i>Tercer sector de la característica de trabajo: elevación del talón y despegue del pie</i>	54
4.4.4	<i>Análisis de los resultados obtenidos al variar la metodológica de obtención de la característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica</i>	55
4.5	RELACIÓN DE LOS VALORES EN LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA Y EL ESTEREOTIPO DEL SUJETO DE PRUEBA	56
4.5.1	<i>Prueba de presión</i>	56
4.5.1.1	Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 1 de la baldosa	56
4.5.1.2	Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 2 de la baldosa	57
4.5.1.3	Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 3 de la baldosa	58
4.5.1.4	Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 4 de la baldosa	58
4.5.1.5	Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 5 de la baldosa	59
4.5.1.6	Discusión de resultados	60
4.5.2	<i>Prueba de la marcha humana</i>	60
4.5.3	<i>Prueba de ubicación</i>	61
4.6	TRABAJOS FUTUROS	62
	CONCLUSIONES	63
	REFERENCIAS	67
	ANEXOS	70



## LISTA DE FIGURAS

FIG. 1.1. ESTRUCTURA DE LAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS PZT. 1) DEBAJO DE LA TEMPERATURA DE CURIE. 2) POR ENCIMA DE LA TEMPERATURA DE CURIE .....	16
FIG. 1.2. DIPOLOS ELÉCTRICOS. 1) CERÁMICAS FERRO ELÉCTRICAS SIN POLARIZAR. 2) DURANTE LA POLARIZACIÓN. 3) DESPUÉS DE LA POLARIZACIÓN (CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS).....	17
FIG. 1.3. EJES DE UN ELEMENTO PIEZOELÉCTRICO .....	18
FIG. 1.4. CONSTANTE DE CARGA PIEZOELÉCTRICA $D_{33}$ .....	19
FIG. 1.5. CONSTANTE DE CARGA PIEZOELÉCTRICA $D_{31}$ .....	19
FIG. 1.6. HISTÉRESIS PIEZOELÉCTRICA .....	22
FIG. 1.7. PIEZOGENERADOR LONGITUDINAL $D_{33}$ .....	26
FIG. 1.8. GENERADORES DE FLEXIÓN DE DOS CAPAS. MONTAJE EN VOLADIZO 1) CONEXIÓN EN SERIE. 2) CONEXIÓN EN PARALELO.....	28
FIG. 3. 1. ESQUEMA MECÁNICO Y PIEZOELÉCTRICO DE UNA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA. EL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO ESTÁ COLOCADO ENTRE DOS PLACAS DE ALUMINIO.....	37
FIG. 3. 2. MODOS DE RECOLECCIÓN PIEZOELÉCTRICA. MODO $D_{33}$ Y $D_{31}$ .....	37
FIG. 3. 3. FASES DEL CICLO DE LA MARCHA .....	38
FIG. 3. 4. 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.....	39
FIG. 3. 5. INTERVALOS DE LA FASE DE BALANCEO: ACELERACIÓN, BALANCEO MEDIO, Y, DECELERACIÓN .....	40
FIG. 3. 6. SISTEMA DE FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL CUERPO HUMANO AL PERMANECER DE PIE Y EN REPOSO A) DIAGRAMA DE FUERZAS B) DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE .....	40
FIG. 3. 7. SISTEMA DE FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL CUERPO HUMANO CUANDO SE ESTÁ PARADO SOBRE UN SOLO PIE.....	41
FIG. 3. 8. DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS VERTICALES QUE SE PRODUCEN AL CAMINAR. LA CURVA VERTICAL FZ AL CAMINAR TÍPICAMENTE APARECEN DOS PICOS: EL PRIMERO, DURANTE EL CONTACTO DEL TALÓN Y EL SEGUNDO, DURANTE EL IMPULSO .....	42
FIG. 3. 9. DIAGRAMA DE BLOQUES BÁSICO PARA EL HARVESTING DE ENERGÍA DE LA MARCHA EN LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS. ....	43
FIG. 3. 10. RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA .....	44
FIG. 3. 11. CIRCUITO DE HARVESTING DE ENERGÍA .....	45
FIG. 4.1. BALDOSA POWERLEAP, CON PLACA PERSONALIZADA.....	47
FIG. 4.2. COMPUESTO DE MACROFIBRAS INCRUSTADO EN EL INTERIOR DE LA BALDOSA POWERLEAP. ....	48
FIG. 4.3. MULTÍMETRO IDVM.....	49
FIG. 4.4. CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE UNA BALDOSA POWERLEAP.....	51
FIG. 4.5. POLARIZACIÓN DEL CRISTAL PIEZOELÉCTRICO DURANTE SU DEFORMACIÓN Y RECUPERACIÓN DE LA FORMA ORIGINAL .....	51
FIG. 4.6. CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA EN EL SECTOR EN EL QUE EL TALÓN HACE CONTACTO CON LA BALDOSA. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	52
FIG. 4.7. CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA EN EL SECTOR EN EL QUE SE REALIZA EL APOYO PLANTAR Y MEDIO SOBRE LA BALDOSA. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	53



FIG. 4.8. CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA EN EL SECTOR EN EL QUE SE PRODUCE LA ELEVACIÓN DEL TALÓN Y DESPEGUE DEL PIE. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	54
FIG. 4.9. CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA OBTENIDA PARA UN APOYO PLANTAR Y MEDIO SOSTENIDO. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	55
FIG. 4.10. ZONIFICACIÓN DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA LA PRUEBA DE PRESIÓN.....	56
FIG. 4.11. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PRESIÓN (APOYO SENCILLO DE UN PASO COMPLETO) EN EL ÁREA 1 DE LA BALDOSA POWERLEAP. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	57
FIG. 4.12. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PRESIÓN (APOYO SENCILLO DE UN PASO COMPLETO) EN EL ÁREA 2 DE LA BALDOSA POWERLEAP. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	57
FIG. 4.13. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PRESIÓN (APOYO SENCILLO DE UN PASO COMPLETO) EN EL ÁREA 3 DE LA BALDOSA POWERLEAP. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	58
FIG. 4.14. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PRESIÓN (APOYO SENCILLO DE UN PASO COMPLETO) EN EL ÁREA 4 DE LA BALDOSA POWERLEAP. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	59
FIG. 4.15. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PRESIÓN (APOYO SENCILLO DE UN PASO COMPLETO) EN EL ÁREA 5 DE LA BALDOSA POWERLEAP. <i>SOFTWARE: MICROSOFT EXCEL</i> .....	59



## LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1. PROPIEDADES DE LAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS SEGÚN LA NORMATIVA NORTEAMERICANA DOD-STD-1376A (SH).....	25
TABLA 1.2. LÍMITE DE TRACCIÓN EN LAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS .....	26
TABLA 4.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MULTÍMETRO IDVM.....	50
TABLA 4.2. TIEMPO DE RECUPERACIÓN DEL PIEZOELÉCTRICO .....	54
TABLA 4.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE PRESIÓN EN LA BALDOSA POWERLEAP .....	60
TABLA 4.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE MARCHA HUMANA SOBRE LA BALDOSA POWERLEAP .....	61
TABLA 4.5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE UBICACIÓN DE LA BALDOSA POWERLEAP: DESCANSO DE ESCALERA AL SUBIR .....	62
TABLA 4.6. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE UBICACIÓN DE LA BALDOSA POWERLEAP: DESCANSO DE ESCALERA AL BAJAR .....	62



## RESUMEN

La presente investigación presenta el análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la utilización de baldosas piezoeléctricas.

Se realiza una breve descripción acerca de la piezoelectricidad con información general acerca de las cerámicas piezoeléctricas y sus principales parámetros, características y limitaciones, y, se describe la clasificación de las cerámicas piezoeléctricas según el estándar norteamericano DOD-STD-1376A (SH).

Además se analiza el funcionamiento de las baldosas piezoeléctricas, explica las generalidades de la cinesiología de la marcha humana y el principio de harvesting de energía a través de una baldosa piezoeléctrica.

Finalmente detalla la estructura de una baldosa piezoeléctrica tipo PowerLeap y se obtiene la característica de trabajo de la baldosa



## INTRODUCCIÓN

El concepto de energy harvesting se basa en la recolección, transformación y almacenamiento de energía proveniente de fuentes naturales. Uno de los dispositivos para realizar el harvesting de energía es el piezoeléctrico. Este trabajo presenta el análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la utilización de baldosas piezoeléctricas, el cual consta de cuatro capítulos.

El primero presenta una breve descripción acerca de la piezoelectricidad. Proporciona información general acerca de las cerámicas piezoeléctricas exponiendo sus principales parámetros, características y limitaciones, y, describe la clasificación de las cerámicas piezoeléctricas según el estándar norteamericano DOD-STD-1376A (SH).

En el segundo, como una primera aproximación a la validación del desempeño de aplicaciones de materiales piezoeléctricos, se describen los principales estándares de la industria.

En el tercer capítulo se describe el funcionamiento de las baldosas piezoeléctricas; se explica las generalidades de la cinesiología de la marcha humana; se detalla el principio de harvesting de energía a través de una baldosa piezoeléctrica, y, se muestra el proceso de harvesting de energía de la marcha en las baldosas piezoeléctricas.

En el cuarto capítulo se describe la estructura de una baldosa piezoeléctrica tipo PowerLeap; se detalla la obtención de la característica de trabajo de la baldosa, se analiza los resultados obtenidos, y, se plantea trabajos futuros.



## OBJETIVOS

- Establecer la línea base sobre la naturaleza de la piezoelectricidad.
- Puntualizar los estándares vigentes en la industria de materiales piezoeléctricos.
- Describir el funcionamiento de las baldosas piezoeléctricas para harvesting de energía.
- Obtener la característica de trabajo de una baldosa piezoeléctrica tipo PowerLeap.
- Diseñar pruebas de desempeño y operación para las baldosas piezoeléctricas tipo PowerLeap.
- Aplicar pruebas de desempeño y operación para las baldosas piezoeléctricas tipo PowerLeap, y analizar sus resultados.



## CAPÍTULO 1

### UNA APROXIMACIÓN A LA NATURALEZA DE LA PIEZOELECTRICIDAD

#### 1.1 INTRODUCCIÓN

Ciertos materiales naturales, poseen propiedades piezoeléctricas como el cuarzo, mientras que otros las obtienen a través de un proceso artificial, como los materiales monocristalinos, las cerámicas, y, los polímeros.

Debido al perfeccionamiento de la fabricación de materiales piezoeléctricos, como las cerámicas tipo PZT (titanato zirconato de plomo) o el polímero PVDF (poli fluoruro de vinilideno), la oferta de materiales con estas propiedades ha crecido exponencialmente, posibilitando su aplicación en varios campos de la industria: medidores de flujos, acelerómetros, instrumentos médicos, instrumentos de ultrasonido; hidrófonos, sistemas de alarmas, actuadores, dispositivos de posicionamiento, entre otros.

Este capítulo describe los aspectos esenciales de la piezoelectricidad, y del funcionamiento y operación de las cerámicas piezoeléctricas, como un primer paso en el desarrollo de aplicaciones concretas de la piezoelectricidad.

#### 1.2 PIEZOELECTRICIDAD

##### 1.2.1 Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico fue descubierto por Jacques y Pierre Curie, en 1880. Ciertos cristales sometidos a una tensión mecánica, se polarizaban eléctricamente (efecto piezoeléctrico directo). Esos mismos materiales se deformaban al ser expuestos a un campo eléctrico (efecto piezoeléctrico inverso) [1].

El efecto piezoeléctrico se presenta en cristales cuya estructura no tiene centro de simetría (Ver Fig. 1.1). La tensión (tracción, o, compresión) aplicada al cristal, altera la posición relativa de los centros de carga positiva y negativa en cada célula elemental, y, conduce a una polarización neta en la superficie del cristal. El efecto es prácticamente lineal, la polarización varía directamente con la tensión aplicada, y, es dependiente de la



dirección. Las tensiones de compresión y tracción generan campos eléctricos (y por lo tanto voltajes) de polaridad opuesta. El efecto es recíproco, de modo que si el cristal está expuesto a un campo eléctrico, se experimenta una deformación elástica, por lo que la longitud puede aumentar o disminuir, de acuerdo con la polaridad del campo [1].

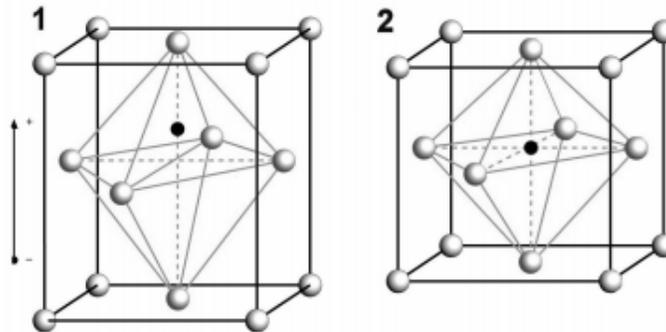


Fig. 1.1. Estructura de las cerámicas piezoeléctricas PZT. 1) Debajo de la temperatura de Curie. 2) Por encima de la temperatura de Curie [2].

Desde un punto de vista eléctrico, la cerámica piezoeléctrica contiene dipolos elementales [3]. Originalmente, los dipolos de la cerámica están orientados al azar; al aplicar un esfuerzo la suma de los desplazamientos de carga es cero, y, el material no exhibe el efecto piezoeléctrico [3].

Al exponer el material cerámico a un fuerte campo eléctrico externo, a alta temperatura (no más allá de la temperatura Curie), los dipolos naturales desaparecen, y, aparecen nuevamente en forma espontánea al disminuir la temperatura. Bajo estas condiciones, los dipolos adoptan la dirección correspondiente a la del campo de polarización. Como resultado, el cuerpo de la cerámica muestra una elongación en esa dirección [3]. Después de remover el campo de polarización, y, enfriar el material, los dipolos no vuelven fácilmente a su posición original, con lo que se obtiene el efecto de polarización remanente del material (Ver Fig. 1.2). El cuerpo cerámico se ha convertido, en forma permanente, en piezoeléctrico.

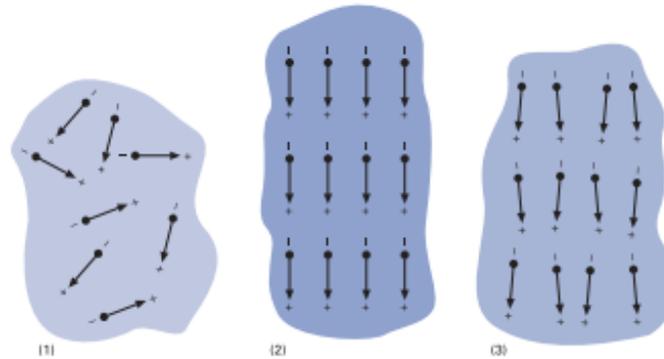


Fig. 1.2. Dipolos eléctricos. 1) Cerámicas ferro eléctricas sin polarizar. 2) durante la polarización. 3) después de la polarización (cerámicas piezoeléctricas) [4].

## 1.2.2 Constantes piezoeléctricas

La relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material, dependen de las propiedades piezoeléctricas de la cerámica, del tamaño, de la forma de la pieza, y, de la dirección de la excitación eléctrica y mecánica [5]. Las constantes piezoeléctricas describen esa relación.

Las constantes piezoeléctricas se representan con dos subíndices, que vinculan magnitudes eléctricas y mecánicas. El primer subíndice, explica la dirección del campo eléctrico asociado con el voltaje aplicado, o, la carga producida. El segundo subíndice, indica la dirección del esfuerzo o stress mecánico [5].

En un elemento piezoeléctrico se reconoce direcciones coincidentes con los ejes mostrados en la Fig. 1.3. Por referencia, el eje Z está orientado en paralelo a la dirección de polarización de la cerámica [5]. En las operaciones de corte, cuando un esfuerzo mecánico o una tensión eléctrica, corta una de las caras del material, el segundo subíndice de la constante piezoeléctrica suele hacer referencia al eje 5 [1].

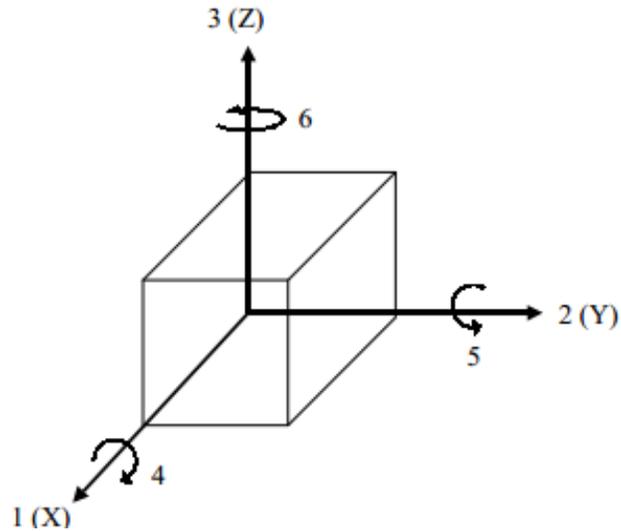


Fig. 1.3. Ejes de un elemento piezoeléctrico [6].

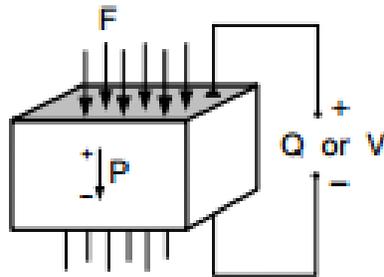
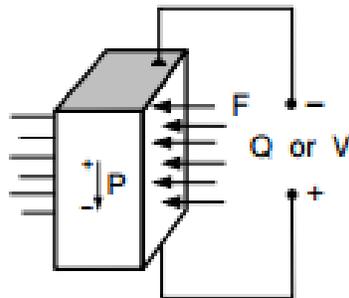
### 1.2.2.1 Constante de carga piezoeléctrica $d_{ij}$

Estas constantes indican la relación entre la variación dimensional del material piezoeléctrico (m) y la diferencia de potencial aplicada (V), o, entre la generación de cargas eléctricas (C) y la fuerza aplicada en el material (N), como lo muestran las expresiones (1) y (2) [7]. Los valores típicos de estas constantes se encuentran entre 0,2 y  $8E-10$  m/V o, entre 20 y  $800 \pi C/N$  [7].

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

$$d = \frac{\text{densidad de carga}}{\text{esfuerzo mecánico aplicado}} \quad (2)$$

Como ejemplo de la lectura de los subíndices de la constante, se puede explicar que  $d_{33}$ , es la carga recolectada por unidad de esfuerzo aplicado en la dirección 3 (a lo largo del eje de polarización); mientras que  $d_{31}$  es la carga que se recoge en la dirección 3, por unidad de esfuerzo aplicado en ángulo recto con el eje de polarización (Ver Fig. 1.4 y 1.5).

Fig. 1.4. Constante de carga piezoeléctrica  $d_{33}$  [5].Fig.1.5. Constante de carga piezoeléctrica  $d_{31}$  [5].

### 1.2.2.2 Constante de tensión piezoeléctrica $g_{ij}$

Estas constantes indican la relación del campo eléctrico producido en una cerámica de 1m de longitud, aplicando un esfuerzo mecánico dado tal como lo muestra la expresión (3) [7]. Los valores típicos de las constantes de tensión están entre -1 y 60 V/N [7].

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

Al disminuir las dimensiones de la cerámica, o. al aumentar el esfuerzo, el módulo de la tensión generada también aumenta. Valores altos de  $g$  son deseados en materiales destinados a generar corriente en respuesta a una tensión mecánica.



### 1.2.2.3 Constante de acoplamiento $k_{ij}$

Estas constantes indican la eficiencia del material piezoeléctrico en la conversión de energía eléctrica en mecánica, o, viceversa. Las constantes de acoplamiento se definen a través de las expresiones (4) y (5), y, son adimensionales. Los valores típicos se encuentran entre 0.02 y 0.75. [7].

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

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

### 1.2.2.4 Constante de conformidad o compliancia elástica $s_{ij}$

Las constantes elásticas  $s$  se definen como la tensión producida por unidad de esfuerzo (6). Estas constantes aparecen como recíproco del módulo de Young  $Y$  (7). El primer subíndice de las constantes se refiere a la dirección de la tensión, y, el segundo se refiere a la dirección del estrés [1].  $s_{33}^D$  es la compliancia de un esfuerzo acompañado de una tensión en la dirección 3 en un circuito eléctrico abierto.  $s_{33}^E$  es la compliancia de un esfuerzo acompañado de una tensión en la dirección 3 en un circuito eléctrico cerrado.

$$s = \text{tensión/esfuerzo} \quad (6)$$

$$Y = \text{esfuerzo/tensión} \quad (7)$$

### 1.2.2.5 Constantes dieléctricas $K_{ij}$

Estas constantes se definen como la relación entre la permitividad del material con la permitividad del espacio libre. Para las constantes  $K_{ij}^T$ , el superíndice T indica que las condiciones de la permitividad se encuentran bajo condiciones de tensión constante. En las constantes  $K_{ij}^S$ , el superíndice S indica que las condiciones de la permitividad se encuentran bajo condiciones de deformación constante.



### 1.2.3 Otras magnitudes de las propiedades piezoeléctricas

#### 1.2.3.1 Factor de calidad mecánico Q

Este factor es una medida relacionada con el amortiguamiento de las oscilaciones mecánicas en el material. Si el factor de calidad mecánico de un dispositivo resonante es 100, esto significa que, si excitado momentáneamente en su frecuencia de resonancia, el material oscilará  $100/2\pi$  veces antes de alcanzar el reposo [7]. Los valores típicos de este factor se encuentran entre 50 y 1500, para cerámicas piezoeléctricas de PZT [7].

#### 1.2.3.2 Factor de disipación dieléctrica $\tan \delta$

Este factor adimensional caracteriza la reducción de las propiedades dieléctricas del material. Los valores típicos del factor, para cerámicas piezoeléctricas PZT, se encuentran entre  $2E-3$  y  $25E-3$ .

#### 1.2.3.3 Temperatura de Curie

Esta es la temperatura a la cual los materiales dejan de presentar propiedades piezoeléctricas. Después de superar esta temperatura, el material pierde la polarización remanente inducida, tornándose inútil para la utilización como elemento transductor de energía eléctrica en mecánica o viceversa [7].

Para cerámicas piezoeléctricas de PZT, los valores de la temperatura de Curie están entre  $150$  y  $350$  °C [7].

### 1.2.4 Histéresis dieléctrica

El ciclo de histéresis dieléctrica muestra el efecto del campo eléctrico sobre la polarización y sobre la alineación de los dipolos (Ver Fig.1.6).

Si un PZT despolarizado se somete al incremento de campo eléctrico, a una temperatura ligeramente por debajo del punto de Curie, los dipolos de a poco se alinean con el campo eléctrico. La polarización empieza a seguir la curva inicial de la histéresis. Cuando el campo se ha incrementado hasta cierto valor, todos los dipolos están alineados con el campo, el material ha llegado a la polarización máxima o de saturación  $P_s$  [1].



Si el campo se reduce, los dipolos empiezan a perder el alineamiento con el campo, y, la polarización disminuye hasta el valor de la polarización remanente  $P_r$  [1]. Si el campo aumenta en dirección opuesta, la polarización cae a cero, y, luego aumenta en la dirección negativa hasta la polarización de saturación  $-P_s$ . Si el campo se reduce de nuevo, la polarización pasa a estado remanente  $-P_r$  [1].

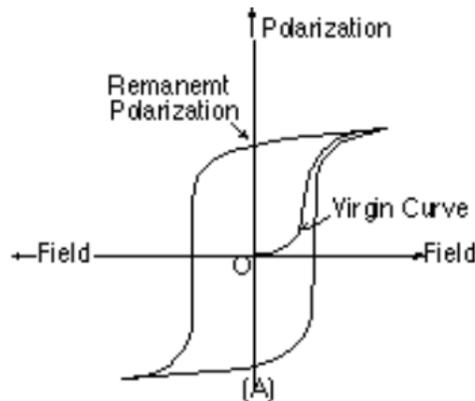


Fig. 1.6. Histéresis piezoeléctrica [7].

### 1.2.5 Clasificación de los materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se clasifican en dos grupos: hard y soft. Esta clasificación se basa en la curva de la histéresis dieléctrica. Los materiales de alta potencia (hard) presentan una curva de histéresis cerrada de área pequeña. Los materiales de alta sensibilidad (soft), presentan una curva de histéresis abierta con área mayor.

La clasificación es adoptada por los principales fabricantes de cerámicas piezoeléctricas, pero existen otros nombres en la industria. ATCP Brasil, denomina a sus cerámicas piezoeléctricas con las siglas SP-N, en donde N representa la clase de cerámica. FERROPERM, denomina a sus cerámicas con las siglas PZ, seguidas por distintos números en función de la clase. EDO, denomina a sus cerámicas con las siglas EC-6n, en donde n es un número que representa a una clase dada de piezoeléctrico. MORGAN, designa a sus cerámicas con las siglas PZT-n, en donde n es un número que representa a cada clase de piezoeléctrico.



### 1.2.5.1 Materiales tipo hard

Estos materiales operan a altas tensiones eléctricas y mecánicas, sin que sus condiciones piezoeléctricas cambien sustancialmente, por lo cual resultan idóneos para aplicaciones de alta potencia [8].

Poseen una moderada permitividad, un gran factor de acoplamiento piezoeléctrico, una buena estabilidad bajo altas tensiones mecánicas y campos de operación, y, bajas pérdidas dieléctricas [8].

Estos materiales se utilizan en la limpieza por ultrasonidos, en el campo médico (instrumentos quirúrgicos), y, en la tecnología del sonar [8].

- **Navy Type I**

Estos materiales, denominados por MORGAN como PZT-4, son capaces de producir grandes vibraciones, manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y las dieléctricas. Son utilizados en aplicaciones acústicas de media y alta potencia, y, en sistemas de limpieza por ultrasonido y sonares [9].

- **Navy Type III**

Estos materiales, denominados por MORGAN como PZT-8, son utilizados para aplicaciones de alta potencia, su nivel de actividad piezoeléctrico es ligeramente inferior al tipo PZT-4. Poseen un factor de calidad mecánica  $Q$  muy alto, y, pérdidas reducidas [9].

### 1.2.5.2 Materiales tipo soft

Estos materiales poseen un alto valor para la constante de carga piezoeléctrica, permitividad moderada, y, altos valores de acoplamiento [8]. Bajo condiciones de alta transmisión, estos materiales son susceptibles al calentamiento espontáneo más allá de su rango de temperatura de funcionamiento.

Entre las aplicaciones de estos materiales, se destacan actuadores, microposicionadores, y, sensores de nanoposición [8].



- **Navy Type II**

Este material, conocido como PZT-5 según el estándar de MORGAN, se utiliza como elemento de transmisión o recepción en hidrófonos, acelerómetros, y, sensores de vibración. Presenta una alta permitividad, alta sensibilidad, y, alta estabilidad en el tiempo [10].

- **Navy Type IV**

Este material, modificación de la composición de titanato de bario, tienen una utilización moderada en aplicaciones de media potencia. Se caracteriza por una menor actividad piezoeléctrica, y, una menor temperatura de Curie que cualquiera de las composiciones de los PZT [10].

- **Navy Type V**

Este material, es una composición intermedia de los tipos II y VI [10]. Conocido como PZT-5J en la nomenclatura de MORGAN, tiene una alta permitividad, y, una alta constante de tensión piezoeléctrica. Es utilizado para hidrófonos, y, aplicaciones que requieren altas energías y alto diferencial de potencial.

- **Navy Type VI**

Este material, denominado PZT-5H por MORGAN, presenta una alta permitividad, un alto acoplamiento, y, una alta constante piezoeléctrica. Es utilizado en aplicaciones que requieren grandes deformaciones mecánicas, como posicionadores y actuadores. Su temperatura de Curie es baja, lo que limita su funcionamiento, y, su estabilidad en el tiempo es menor [10].

La Tabla 1.1 resume algunas de las propiedades de las cerámicas piezoeléctricas.



Tabla 1. 1. Propiedades de las cerámicas piezoeléctricas según la normativa norteamericana DOD-STD-1376A (SH).

Propiedad	Navy I	Navy II	Navy III	Navy IV	Navy V	Navy VI
$K_{33}^T (\pm 12,5\%)$	1275	1725	1025	1275	2500	3250
$tg (\delta)$	$\leq 0,006$	$\leq 0,020$	$\leq 0,004$	$\leq 0,010$	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$
$k_p$	0,58	0,60	0,50	0,30	0,63	0,64
$d_{33} \left( e^{-12} \frac{m}{V} \right) (\pm 15\%)$	290	390	215	140	495	575
$p (g/cm^3)$	$\geq 7,45$	$\geq 7,60$	$\geq 7,45$	$\geq 5,50$	$\geq 7,40$	$\geq 7,40$
<b>Q</b>	$\geq 500$	$\geq 75$	$\geq 800$	$\geq 400$	$\geq 70$	$\geq 65$
<b>Tc (<math>^{\circ}C</math>)</b>	325	350	325	115	240	65
<b>Tipo</b>	Hard	Soft	Hard	Soft	Soft	Soft

## 1.2.6 Limitaciones de los materiales piezoeléctricos

### 1.2.6.1 Envejecimiento

Con el tiempo, la polarización remanente inducida durante el proceso de fabricación de la cerámica se desvanece naturalmente, independientemente de los agentes externos o del uso del material [7].

Las tasas de envejecimiento son considerablemente más elevadas, si el material es utilizado en dispositivos de potencia o sometido a altos campos y deformaciones. El parámetro de mayor influencia sobre las tasas de envejecimiento es la temperatura: cuanto mayor sea la temperatura y más próxima este a la temperatura de Curie, mayores serán las tasas. Se aconseja considerar como temperatura máxima de funcionamiento un 60 % de la temperatura de Curie.

### 1.2.6.2 Variabilidad de las propiedades piezoeléctricas en función de la temperatura

Las constantes dieléctricas, las constantes de carga piezoeléctrica, y, el factor de calidad Q, son afectados por la temperatura. En el caso de las cerámicas, la afectación de la temperatura es más intensa e impredecible, debido a la complejidad de los mecanismos del efecto piezoeléctrico [7].



### 1.2.6.3 Límite de excitación eléctrico y mecánico

Las cerámicas piezoeléctricas son materiales frágiles poco resistentes a la tracción, siendo importante observar los límites de cada material para evitar rupturas [7] (Ver Tabla 1.2).

Tabla 1. 2. Límite de tracción en las cerámicas piezoeléctricas.

(psi)	Navy I	Navy II	Navy V	Navy VI
<b>Dinámico</b>	6000	4000	4000	4000
<b>Estático</b>	11000	11000	10000	10000

## 1.3 PIEZOGENERADORES

Los piezogeneradores son máquinas estáticas que convierten fuerza mecánica y movimiento, en voltaje y carga. Los piezogeneradores pueden estar configurados en capas, o, en múltiples capas conectadas en serie o en paralelo.

### 1.3.1 Piezogeneradores de una capa

Cuando, en la dirección longitudinal (paralela a la polarización), se aplica una tensión mecánica a una sola capa (hoja) de piezocerámica, se genera un voltaje que trata de devolver la pieza a su espesor original. Se obtiene entonces un piezogenerador longitudinal (Ver Fig.1.7), ejemplo típico de un piezogenerador de una capa.

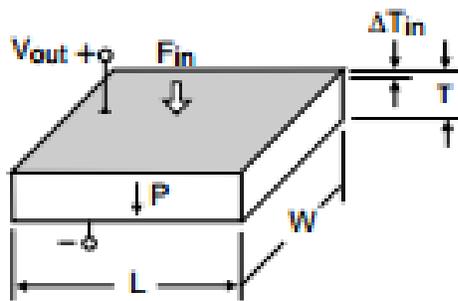


Fig. 1.7. Piezogenerador longitudinal  $d_{33}$  [11].



La carga y voltaje en un piezogenerador longitudinal, se determinan a través de las expresiones (8) y (9).

$$Q = Fd_{33} \quad (8)$$

En dónde,

$Q$ , es la carga producida en C.

$F$ , es la fuerza aplicada en N.

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

$$\frac{V}{T} = \frac{Fg_{33}}{LW} \quad (9)$$

En dónde,

$V$ , es el voltaje en V.

$T$ , es el espesor de la capa en m.

$F$ , es la fuerza aplicada en N.

$g_{33}$ , es el campo eléctrico inducido por unidad de esfuerzo mecánico aplicado en la dirección 3 en Vm/N.

$L$ , es la longitud de la capa en m.

$W$ , es el ancho de la capa en m.

### 1.3.2 Piezogeneradores de múltiples capas

Al aplicar una tensión mecánica a un laminado de dos capas, los resultados de la generación dependen de la dirección de la fuerza, de la dirección de polarización, y, del cableado de las capas individuales.

El cableado para dos capas en serie, utiliza sólo dos cables, uno conectado a cada electrodo exterior. El cableado para dos capas en paralelo, requiere tres cables, uno conectado a cada electrodo exterior, y, otro conectado a la placa de apoyo del centro [11] (Ver Fig.1.8).

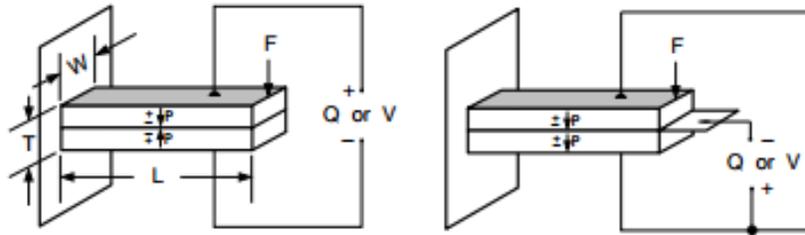


Fig. 1.8. Generadores de flexión de dos capas. Montaje en voladizo 1) Conexión en serie. 2) Conexión en paralelo [11].

La carga y el voltaje generado por piezogeneradores de dos capas, se determinan a través de las expresiones (10), (11), (12), y, (13).

Para una conexión se serie se cumple que:

$$Q = \frac{3FL^2 d_{31}}{2T^2} \quad (10)$$

$$V = \frac{3FLg_{31}}{2WT} \quad (11)$$

En dónde,

$Q$ , es la carga en C.

$V$ , es el voltaje en V.

$F$ , es la fuerza aplicada en N.

$d_{31}$ , es la carga que se recoge en la dirección 3, por unidad de esfuerzo aplicado en ángulo recto con el eje de polarización en C/N.

$g_{31}$ , es el campo eléctrico inducido en la dirección 3, por unidad de esfuerzo mecánico aplicado en ángulo recto con el eje de polarización en Vm/N.

$W$ , es el ancho de las capas en m.

$L$ , es la longitud de las capas m.

$T$ , es el espesor de las capas m.



Para una conexión en paralelo se cumple que:

$$Q = \frac{3FL^2 d_{31}}{T^2} \quad (12)$$

$$V = \frac{3FLg_{31}}{4WT} \quad (13)$$

En dónde,

*Q*, es la carga en C.

*F*, es la fuerza aplicada en N.

*d*<sub>31</sub>, es la carga que se recoge en la dirección 3, por unidad de esfuerzo aplicado en ángulo recto con el eje de polarización en C/N.

*g*<sub>31</sub>, es el campo eléctrico inducido en la dirección 3, por unidad de esfuerzo mecánico aplicado en ángulo recto con el eje de polarización en Vm/N.

*L*, es la longitud de las capas en m.

*W*, es el ancho de las capas en m.

*T*, es el espesor de las capas en m.



## CAPÍTULO 2

### ESTÁNDARES VIGENTES EN LA INDUSTRIA DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

La fabricación de materiales piezoeléctricos, y, la construcción de aplicaciones de ingeniería que los aprovechen, son dos áreas crecientes de la economía.

En este contexto, especial interés merece la utilización de materiales piezoeléctricos para el harvesting de energía, tarea que vincula cada vez más grupos en distintos países del mundo; situación que obliga a reforzar la utilización de estándares y normas industriales a fin de garantizar la compatibilidad e interoperabilidad de la tecnología desarrollada.

Este capítulo revisa el estado de desarrollo de la normativa para la industria de los materiales piezoeléctricos, como base para un prospectivo desarrollo de aplicaciones locales.

#### 2.2 ESTÁNDARES DESARROLLADOS POR EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION CENELEC PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

CENELEC ha aprobado tres normas relacionadas a materiales piezoeléctricos, y, se encuentran en desarrollo tres pre-normas bajo la referencia BTTF-63-2 [12].

##### 2.2.1 EN 50324-1:2002 propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos y sus componentes - Parte 1: Definiciones y clasificaciones

Esta norma europea (EN), incluye definiciones y características de las cerámicas piezoeléctricas y transductores [12].

También explica las condiciones marginales, y, los métodos de ensayo para la determinación de las características de las cerámicas piezoeléctricas y transductores, principalmente destinadas a la generación y transmisión de señales acústicas, a la consecución de efectos de ultrasonidos; a la transmisión de señales en comunicación



electrónica, a sensores y actuadores, y, a la generación de altas tensiones en dispositivos de ignición [13].

### **2.2.2 EN 50324-2:2002 Propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos y sus componentes - Parte 2: Métodos de medición y propiedades de baja potencia**

Esta norma explica los métodos de medición de dieléctricos, y, de coeficientes piezoeléctricos y elásticos, de las cerámicas piezoeléctricas descritas en la norma anterior [14].

Los coeficientes piezoeléctricos y elásticos tienen un origen complejo, dependiente de la naturaleza de la cerámica, de las fluctuaciones estadísticas de la composición, y, del proceso mismo de fabricación, por lo que sus valores son proporcionados como información de diseño solamente [13].

Aunque los transductores piezoeléctricos, tienen formas diversas y emplean variedad de modos de vibración, los parámetros de los materiales se miden a través de simples piezas de prueba (discos o barras) bajo condiciones específicas de límites geométricos y eléctricos. En consecuencia, los parámetros básicos del material pueden ser utilizados sólo como referencia de las propiedades reales de los componentes manufacturados comercialmente [13].

### **2.2.3 EN 50324-3:2002 Propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos y sus componentes - Parte 3: Métodos de medición de alta potencia**

Esta norma se refiere a transductores de cerámicas piezoeléctricas, para aplicaciones de energía en un amplio rango de frecuencia, tanto para convertidores eléctrico-mecánicos como mecánico-eléctricos [15].

### **2.2.4 prEN 50ZZZ-1 (BTTF 63-2 (CONV) 12) Propiedades de actuadores de múltiples capas - Parte 1: Términos y definiciones**

Esta pre-norma europea define los conceptos fundamentales de los actuadores multicapa, empleados en diversos campos de la industria: [13]



- *Ingeniería mecánica*: en herramientas de posicionamiento, abrazaderas, cuñas, amortiguación, generación de vibraciones sónicas o ultrasónicas, etc.
- *Microelectrónica*: para posicionamiento de máscaras, obleas o cabezas magnéticas, accionamiento no magnético, disyuntores, etc.
- *Líquidos*: en válvulas, bombas de inyección de tinta, generadores de gotas, inyectores, etc.
- *Óptica*: en espejos o lentes de posicionamiento, ajuste de cavidad láser, alineación o deformación de la fibra, escáneres, interferómetros, moduladores, etc.

Los actuadores multicapa pueden ser fabricados en varios tamaños. La forma más común, es la de barra rectangular. Las mediciones bajo pretensado, se aplican a los actuadores de pila. Esta pre-norma se refiere a los actuadores  $d_{33}$ , que se alargan en la dirección de polarización, y, que están limitados a aplicaciones estáticas y cuasiestáticas [13].

#### **2.2.5 prEN 50ZZZ-2 (BTTF 63-2 (CONV) 12) Propiedades de actuadores de múltiples capas - Parte 2: Métodos de medición**

Esta pre-norma europea, describe los métodos de medición de las propiedades de los actuadores multicapa, conforme la prEN 50ZZZ-1.

#### **2.2.6 prEN 50PPP (BTTF 63-2 (CONV) 12) Propiedades de películas gruesas piezoeléctricas**

Esta pre-norma europea, describe las propiedades de las películas piezoeléctricas.

### **2.3 ESTÁNDARES DESARROLLADOS POR INTERNATIONAL COMMISSION ELECTROTECHNICAL IEC PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS**

IEC es la organización internacional encargada de elaborar normas para la industria de la electrotecnia. Las normas IEC son mantenidas por varios comités técnicos y subcomisiones. IEC también sirve de base para la conformación de grupos de evaluación en todos los campos de la electrotecnia [13].



El **comité IEC TC49** está a cargo de la normalización de dispositivos piezoeléctricos, y, dieléctricos para control y selección de frecuencia, y, en lo referente a piezoeléctricos ha elaborado normas como: [13]

- IEC 60483 (1976-01), guía para las mediciones dinámicas de cerámicas piezoeléctricas con alto acoplamiento electromecánico.
- IEC 60302 (1969-01), definición de los estándares y métodos de medición piezoeléctricos de vibración, que operan en el rango de frecuencia hasta 30 MHz.
- IEC 60642 (1979-01), cerámicas resonadoras piezoeléctricas y unidades del resonador para el control y selección de frecuencia - Capítulo I: Condiciones y valores generales - Capítulo II: Condiciones de medición y ensayo.
- IEC 60642-2 (1994-02), unidades de las cerámicas resonadoras piezoeléctricas Parte 2: Guía para el uso de las unidades de las cerámicas resonadoras piezoeléctricas.
- IEC 60642-3 (1992-03), resonadores cerámicos piezoeléctricas - Parte 3: Esquemas del estándar.
- IEC 61253-1 (1993-12), IEC 61253-2 (1993-12), IEC 61253-2-1 (1993-12), normas que presentan especificaciones en el sistema de evaluación de la calidad del IEC para los componente electrónicos (IECQ) sobre resonadores cerámicos piezoeléctricos.
- IEC 61261-1 (1994-03), IEC 61261-2 (1994-03), IEC 61261-2-1 (1994-03), normas que realizan especificaciones en el sistema de evaluación de la calidad del IEC para los componentes electrónicos (IECQ) sobre filtros cerámicos piezoeléctricos para su uso en equipos electrónicos.
- IEC 61994-4-2 TS Ed. 1,0 B 1CD, dispositivos piezoeléctricos y dieléctricos para el control y selección de la frecuencia - Glosario - Parte 4-2: Materiales piezoeléctricos - Cerámicas piezoeléctricas.

El **comité IEC TC87** está a cargo de la normalización en el área de ultrasonido, y, en lo referente a piezoeléctricos ha elaborado la norma IEC 61088 (1991-09) características y medidas de los transductores piezoeléctricos de ultrasonidos, que especifica las características esenciales de los transductores electroacústicos piezocerámicos para aplicación industrial de energía ultrasónica. También especifica los métodos de medición de estas características. Tiene el estatus de un informe técnico [13].

La **subcomisión 47E del comité IEC SC47**, encargada de la normalización de dispositivos semiconductores discretos, en relación a los piezoeléctricos, ha elaborado la norma IEC 60747-14-1 (2000-10), dispositivos de semiconductores - Parte 14-1: sensores



semiconductores, general y clasificación, que describe los elementos generales y las especificaciones de los sensores que están básicamente hechas de materiales semiconductores, pero también aplicable a los sensores por medio de dieléctrico o materiales ferroeléctricos [13].

#### **2.4 ESTÁNDARES DESARROLLADOS POR ULTRASONIC, FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL SOCIETY OF THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS IEEE-UFFC PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS**

IEEE ha publicado algunas de las normas más citadas sobre materiales piezoeléctricos y ferroeléctricos, como la 176-1987 IEEE estándar de piezoelectricidad, y, la 180-1986 IEEE definiciones de términos eléctricos y ferroeléctricos. A pesar de haber sido retiradas, estas normas son consideradas un documento histórico.

Actualmente, bajo el auspicio de IEEE-UFFC, existen dos grupos activos de trabajo: el subcomité para pérdidas de materiales acústicos, y, el equipo que define los términos para ferroelectricidad [13].

#### **2.5 OTROS ESTÁNDARES DESARROLLADOS PARA LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS**

**US military Standards**, desarrolló la norma MIL-STD 1376B (SH) cerámica piezoeléctrica y medidas del material - directrices para transductores de sonar. Esta norma fue cancelada en 1999, pero todavía se refiere extensamente, como la fuente de varios tipos de materiales piezoeléctricos [13].

**Versailles Project on Advanced Materials and Standards VAMAS**, a través del grupo TWA24, trabaja en el estudio de propiedades de rendimiento de la electrocerámica. También está en marcha la intercomparación internacional del coeficiente piezoeléctrico directo, utilizando el método de Berlincourt [13].

**Electronic Industries Alliance**, elaboró la EIA 521 guía de aplicación para condensadores cerámicos multicapa – electricidad, documento que cubre las clases de condensadores I-IV [13].



**Electronic Materials Manufacturers Association of Japan**, una organización sin fines de lucro que desarrolla y publica estándares de consenso voluntario para los dispositivos electrónicos, ha elaborado las normas EMAS-6100 métodos de prueba electrónicos para la caracterización de osciladores de cerámica piezoeléctricos, y, EMAS-6008 método de prueba para prestaciones mecánicas y resistencia química [13].



## CAPÍTULO 3

### UTILIZACIÓN DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS PARA HARVESTING DE ENERGÍA

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía, y, el despertar de una conciencia de conservación del planeta ante los problemas ambientales, han llevado a explorar nuevas fuentes de energía.

En este contexto, especial interés merece el desarrollo de tecnología para harvesting de energía. La energía capturada, a escala humana puede ser utilizada entonces, para alimentar dispositivos eléctricos o electrónicos de bajo consumo.

Para el harvesting de energía, se utiliza ampliamente el efecto piezoeléctrico. Empresas como POWERleap, Pavegen, Innowattech, y, otras, han desarrollado sistemas comerciales de pavimento, que generan electricidad bajo este efecto.

La generación de energía eléctrica con ayuda de baldosas piezoeléctricas, depende de al menos dos grupos de variables: aspectos constructivos de la baldosa, y, particularidades de la marcha humana.

En este capítulo se obtiene una explicación detallada de estas variables.

#### 3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS

Las baldosas piezoeléctricas aprovechan el efecto piezoeléctrico directo. Constructivamente, en la baldosa se coloca dos placas de aluminio, separadas de 4 a 10 mm, y, con la capacidad de desplazarse una respecto de otra, al ser pisadas. En medio de las placas, se ubica una pastilla de material piezoeléctrico (ver Fig. 3.1).

Al ejercer presión sobre la baldosa, las placas se desplazan y accionan el material piezoeléctrico, en el que la energía mecánica se convierte en energía eléctrica.

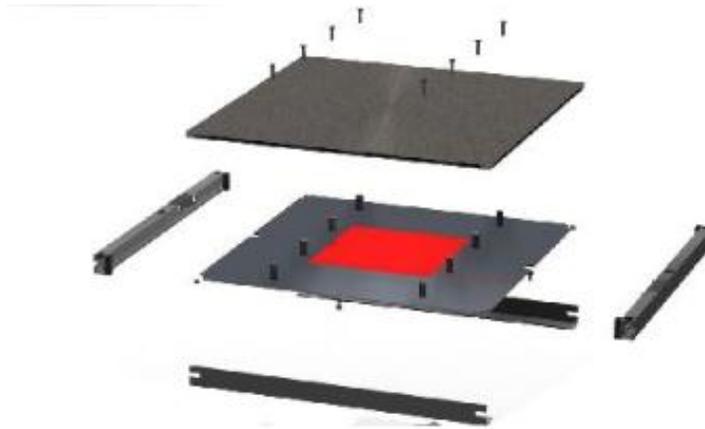


Fig. 3. 1. Esquema mecánico y piezoeléctrico de una baldosa piezoeléctrica. El material piezoeléctrico está colocado entre dos placas de aluminio [16].

La revisión bibliográfica muestra que, los métodos de recolección piezoeléctrica más comunes, son el modo de compresión  $d_{33}$ , y, el modo de vibración  $d_{31}$  (Ver Fig. 3.2) [17]. En condiciones iguales, el modo de compresión  $d_{33}$  permite obtener una mayor potencia, debido a las características naturales del efecto piezoeléctrico [18]. Por eso, las baldosas piezoeléctricas funcionan generalmente en este modo.

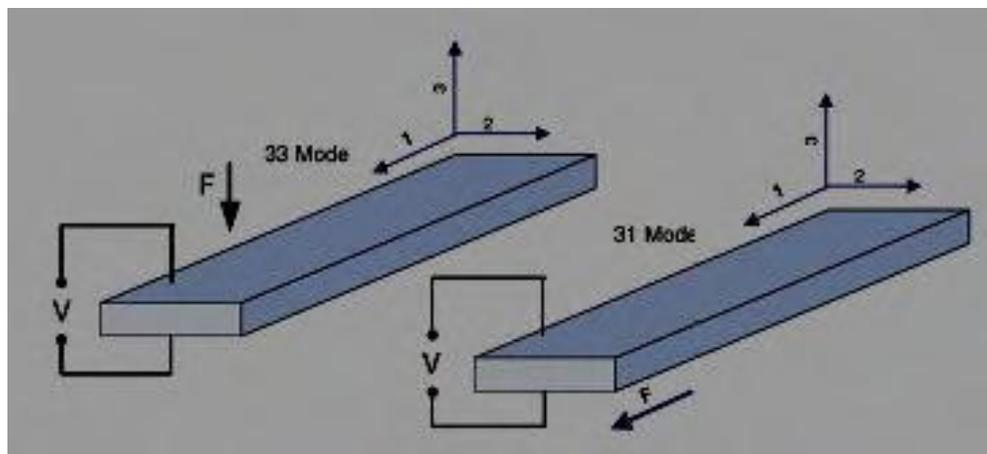


Fig. 3. 2. Modos de recolección piezoeléctrica. Modo  $d_{33}$  y  $d_{31}$  [17].



### 3.3 CINESIOLOGÍA DE LA MARCHA HUMANA

La cinesiología describe la marcha humana como un proceso, desde una perspectiva mecánica.

#### 3.3.1 El ciclo de la marcha

El ciclo de la marcha comienza cuando un pie hace contacto con el suelo, y, termina con el siguiente contacto del mismo pie. A la distancia entre estos dos puntos de contacto con el suelo, se le llama un paso completo [19].

El ciclo de la marcha consta de dos componentes, conocidos como la fase de apoyo, y, la fase de balanceo. Una pierna está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo, y, después, está en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo [19]. Durante la marcha, estas dos fases se alternan de una pierna a la otra.

En un paso completo, el apoyo sencillo se refiere al período cuando sólo una pierna está en contacto con el suelo. El período de doble apoyo, ocurre cuando ambos pies están en contacto con el suelo, simultáneamente (ver Fig. 3.3). La diferencia entre correr y caminar es la ausencia de un período de doble apoyo [19].

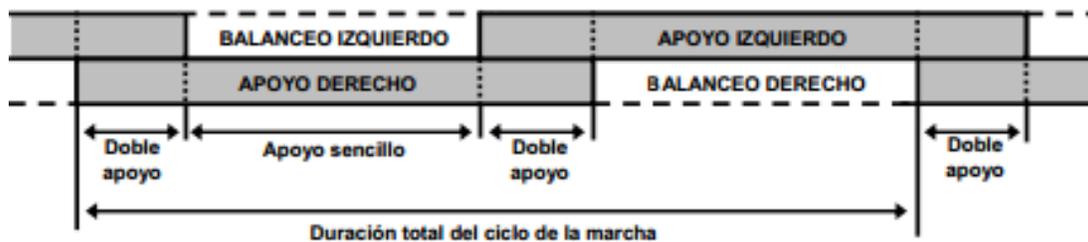


Fig. 3. 3. Fases del ciclo de la marcha [19].

A velocidad normal, durante el ciclo de la marcha, el 60% del tiempo se relaciona a la fase de apoyo, y, un 40% a la fase de balanceo. Del tiempo empleado en la fase de apoyo, un 20% corresponde al doble apoyo [20].

La fase de apoyo está dividida en cinco intervalos (ver Fig. 3.4). [20]:



- *Contacto del talón*, cuando el talón toca el suelo.
- *Apoyo plantar*, que es el contacto de la parte anterior del pie con el suelo.
- *Apoyo medio*, que es el momento en que, el trocánter mayor se encuentra alineado verticalmente con el centro del pie, visto desde el plano sagital.
- *Elevación del talón*, que es el instante en el que el talón se eleva del suelo.
- *Despegue del pie*, que es el momento en el que los dedos se elevan del suelo.

El intervalo de aceptación del peso empieza en el contacto del talón y termina con el apoyo plantar. El intervalo de apoyo medio empieza con el apoyo plantar y termina con la elevación del talón. El despegue se extiende desde la elevación del talón al despegue de los dedos [20] (Ver Fig. 3.4).

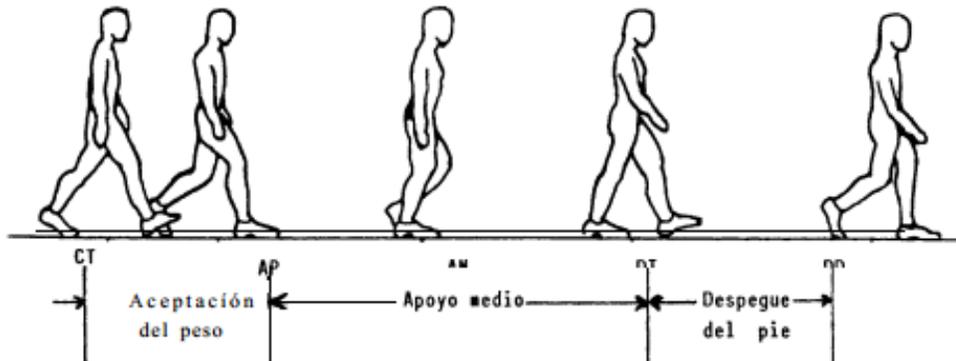


Fig. 3. 4. Intervalos de la fase de apoyo. CT: contacto del talón, AP: apoyo plantar, AM: Apoyo medio, ET: Elevación del talón, DP: Despegue del pie. Intervalos: Aceptación del peso, Apoyo medio y Despegue del pie [20].

La fase de balanceo se divide en tres intervalos [19]:

- *Aceleración*, que se caracteriza por la rápida aceleración del extremo de la pierna inmediatamente después que los dedos dejan el suelo.
- *Balanceo medio*, cuando la pierna en movimiento rebasa a la pierna de apoyo como un péndulo.
- *Desaceleración*, cuando la pierna desacelera al acercarse al final del intervalo (Ver Fig. 3.5).

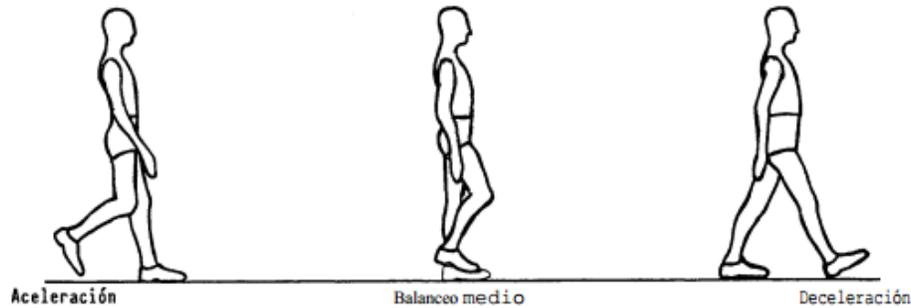


Fig. 3. 5. Intervalos de la fase de balanceo: aceleración, balanceo medio, y, deceleración [20].

### 3.3.2 Biomecánica de la marcha

#### 3.3.2.1 Una persona de pie

Al permanecer de pie y en reposo, una persona tiene dos puntos de apoyo sobre el piso (ver Fig. 3.6). En este caso, sobre el cuerpo humano actúan las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  (reacción del piso), y, el peso  $W$  [6]. El diagrama de cuerpo libre (ver Fig. 3.6b.), muestra que  $F_1 = F_2 = 1/2W$ , lo que indica que el peso del cuerpo se distribuye por igual, sobre las dos piernas.

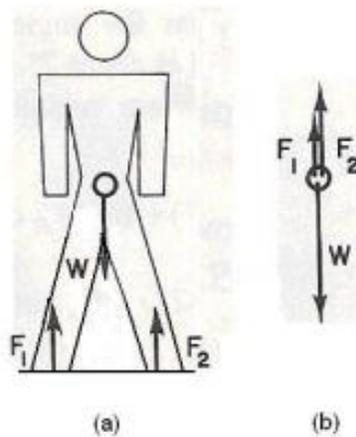


Fig. 3. 6. Sistema de fuerzas que actúan sobre el cuerpo humano al permanecer de pie y en reposo a) Diagrama de fuerzas b) Diagrama de cuerpo libre [21].



### 3.3.2.2 Una persona caminando

Cuando una persona camina, permanece por algunos segundos, parada, sobre un solo pie. Esta situación, se repite periódicamente a lo largo de la marcha, justo antes del instante en que se da el siguiente paso [21]. El análisis de fuerzas (ver Fig. 3.7), demuestra que la fuerza de reacción  $N$  del piso sobre el pie de apoyo, es igual al peso  $W$ . Todo el peso del cuerpo humano, es soportado por una sola pierna.

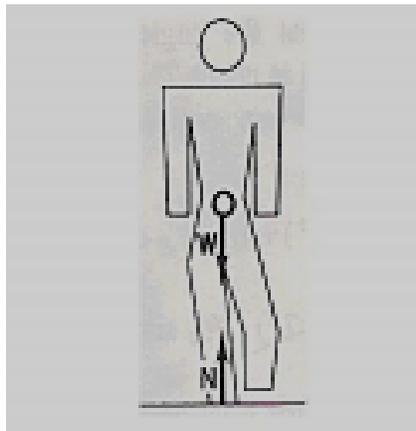


Fig. 3. 7. Sistema de fuerzas que actúan sobre el cuerpo humano cuando se está parado sobre un solo pie [21].

### 3.3.2.3 Fuerzas de reacción

Durante la marcha, aparecen fuerzas de reacción como las denominadas  $F_x$ ,  $F_y$ , y,  $F_z$ .

Las fuerzas  $F_x$  actúan en el eje antero-posterior. Estas fuerzas serán negativas en la etapa de frenado durante la marcha o en carrera, y, serán positivas en la fase de aceleración [22].

Las fuerzas  $F_y$  actúan en el eje medio-lateral. Al empujar el suelo hacia un lado, este devuelve una fuerza de reacción en el eje medio-lateral, en el sentido contrario. Esto sucede durante los apoyos, en el momento en que el centro de gravedad del cuerpo, se encuentra desplazado hacia un lado u otro de la base de sustentación.



Las fuerzas  $F_z$  actúan en el eje vertical. Al apoyarse en el suelo, el pie recibe (si el suelo no se deforma) una fuerza de igual magnitud y dirección, pero de sentido contrario [22].

Al estudiar el sistema resultante de fuerzas en la baldosa piezoeléctrica, se considerará que las fuerzas  $F_x$  y  $F_y$  son nulas.

En marcha y en carrera, aparecen dos picos o crestas de  $F_z$ , y, entre ellos un valle. La primera cresta, se denomina *pico de frenado o de impacto*, y, la segunda, *pico de aceleración o de impulso* (ver Fig. 3.8).

En la marcha, ambos picos alcanzan un valor similar, en torno a 1,2 veces el peso de la persona (BW) [22]. En la carrera, a medida que aumenta la velocidad, disminuye el tiempo de apoyo, los picos se acercan en el tiempo, aumentan los valores de los picos, y de a poco predomina el pico de impacto. Con una gran velocidad, el pico de aceleración puede incrustarse en el pico de impacto. En la carrera de fondo, el pico de impacto puede alcanzar valores de 2 BW; en la carrera de velocidad puede alcanzar 3BW; y, en la caída de un rebote al practicar baloncesto puede llegar hasta 5BW [22].

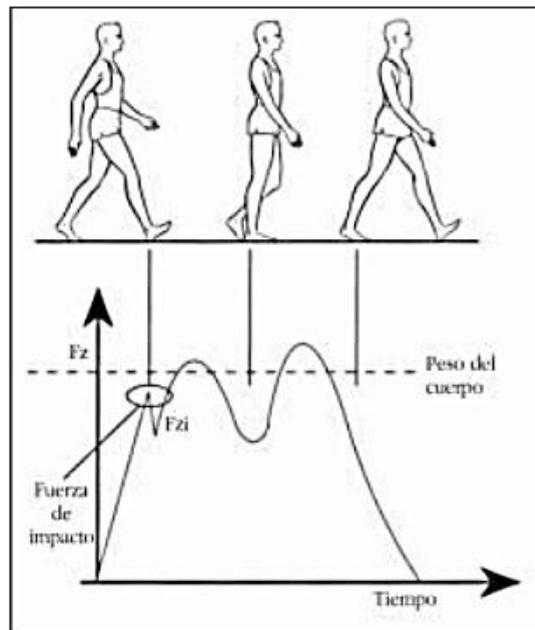


Fig. 3. 8. Distribución de fuerzas verticales que se producen al caminar. La curva vertical  $F_z$  al caminar típicamente aparecen dos picos: el primero, durante el contacto del talón y el segundo, durante el impulso [23].



### 3.3.2.4 Presión plantar

Se conoce como presión plantar, a la suma de todas las fuerzas verticales, registradas en una superficie concreta de la planta del pie [22].

## 3.4 HARVESTING DE ENERGÍA DE LA MARCHA A TRAVÉS DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS

La Fig. 3.9, muestra un esquema de las etapas básicas del harvesting de energía de la marcha humana, a través de baldosas piezoeléctricas.

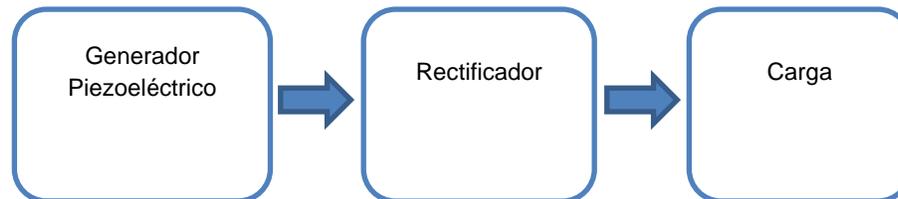


Fig. 3. 9. Diagrama de bloques básico para el harvesting de energía de la marcha en las baldosas piezoeléctricas.

### 3.4.1 Generador piezoeléctrico

Al pisar las baldosas piezoeléctricas, se ejerce una presión sobre las placas de aluminio que se desplazan perpendicularmente. Este esfuerzo mecánico se transmite al material piezoeléctrico en medio de las placas, que se deforma. Con esto, la posición de los centros de carga positiva y negativa de cada célula elemental del cristal piezoeléctrico se altera, y, como resultado se obtiene carga eléctrica.

### 3.4.2 Rectificador

El voltaje y la corriente a la salida de las baldosas piezoeléctricas, son transitorios. Con ayuda de un rectificador, se obtiene una señal continua [25]. Uno de los rectificadores más simples es el puente de diodos, conocido como rectificador de onda completa (ver Fig. 3.10).

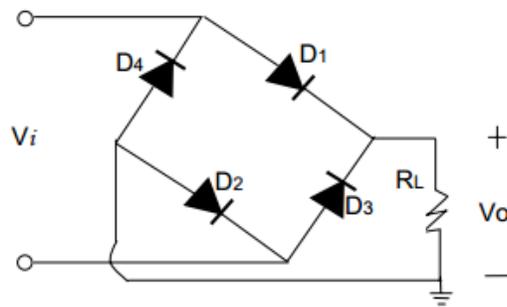


Fig. 3. 10. Rectificador de onda completa [26].

En el semiciclo positivo del voltaje de entrada, los diodos D1 y D3 conducen, lo que da lugar a un semiciclo positivo en la resistencia de carga. Los diodos D2 y D4, conducen en el semiciclo negativo, lo que produce otro semiciclo positivo en la resistencia de carga [27]. Es posible colocar un capacitor en paralelo, a la salida del rectificador, para mantener el voltaje de salida en un estado de equilibrio después de alcanzar su máximo valor. Esto se logra ya que el condensador se carga hasta cierto nivel antes de realizar la descarga al dispositivo de almacenamiento [28].

### 3.4.3 Carga

La energía eléctrica generada es almacenada en condensadores, supercapacitores, o, baterías recargables. Los condensadores se utilizan únicamente como dispositivos temporales de almacenamiento, debido a una mayor tasa de autodescarga en comparación con las baterías [29]. Los supercapacitores, tienen una densidad de energía de 10 a 100 veces mayor que la de los condensadores electrolíticos tradicionales [30]. Las baterías empleadas para almacenamiento, se pueden seleccionar entre las de litio-ion y las de níquel-cadmio [30].

La Fig. 3.11 muestra un esquema del circuito para el harvesting de energía a través de una baldosa piezoeléctrica. La fuente de corriente y el capacitor en paralelo, representan al generador piezoeléctrico.

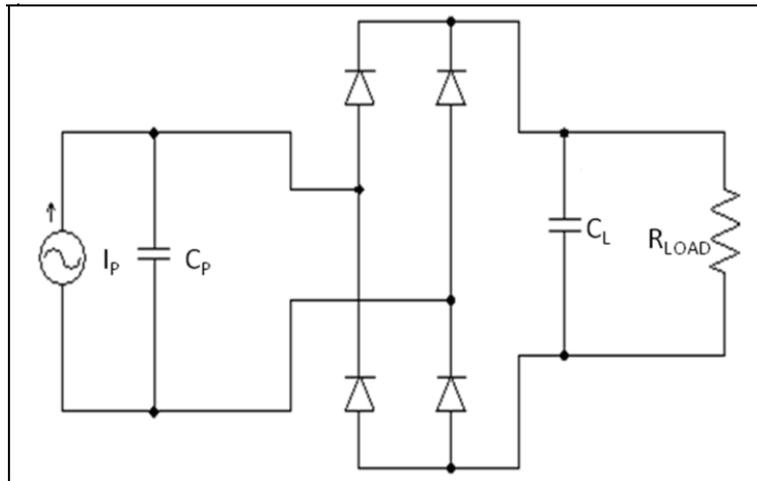


Fig. 3. 11. Circuito de harvesting de energía [24].

La energía almacenada se puede utilizar para proveer a dispositivos de bajo consumo, como iluminación LED, pantallas y señalización, redes de sensores, dispositivos celulares, alarmas, entre otros.



## CAPÍTULO 4

### OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE UNA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

Se entiende por señal eléctrica a una magnitud, cuyo valor o intensidad depende del tiempo. Para la caracterización de una señal, se puede considerar la amplitud pico y el período.

En el marco de este proyecto, el interés gira entorno a la caracterización de la señal de salida de una baldosa piezoeléctrica (característica de trabajo), considerando aspectos como peso, velocidad del paso, y, tipo de calzado que usa el individuo que provoca la señal a través de la baldosa.

Para los experimentos, se utilizó una baldosa PowerLeap, y, se acordó que el individuo de prueba debería ejecutar un paso completo y realizar un apoyo sencillo sobre la baldosa. Este capítulo resume los resultados obtenidos.

#### 4.2 DESCRIPCIÓN DE UNA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP

Constructivamente, una baldosa piezoeléctrica de PowerLeap (ver Fig. 4.1), está montada sobre una estructura de aluminio de 3 cm de altura, 50 cm de ancho, y, 50 cm de largo, que soporta hasta 100 KN de peso. Sobre esta estructura, se disponen dos placas metálicas de aluminio de 3 y 4 mm de espesor, que pueden desplazarse hasta 5 mm en toda su superficie (al ser pisadas). En medio de las dos placas, se encuentra incrustado el material piezoeléctrico.



Fig. 4.1. Baldosa PowerLeap, con placa personalizada.

El material piezoeléctrico utilizado, es un compuesto de macrofibras piezoeléctricas (MFC) desarrollado en la NASA Langley Research Center, y, que consta de finas fibras PZT incrustadas en una película polimérica adhesiva, y, cubierto con un patrón de electrodos interdigitados [31]. Las fibras piezoeléctricas tienen secciones transversales rectangulares, dispuestas con espaciado regular y alineación paralela precisa [32]. La película polimérica combina propiedades eléctricas, térmicas, químicas, y, mecánicas, para ambientes exigentes con temperaturas extremas y vibraciones [33]. Los electrodos interdigitados permiten que el campo eléctrico aplicado se ejecute axialmente, con lo que se logra que el coeficiente  $d_{33}$  sea mayor al coeficiente  $d_{31}$  activo en un PZT monolítico. Como resultado, el MFC tiene sustancialmente un coeficiente de acoplamiento electromecánico mayor, y, produce una fuerza y un desplazamiento mayor que cualquier otro compuesto piezoeléctrico [31]. Una baldosa PowerLeap, aloja un MFC de 8.4 cm de largo, y, de 8.3 cm de ancho, polarizado en paralelo (Ver Fig. 4.2).



Fig. 4.2. Compuesto de macrofibras incrustado en el interior de la baldosa PowerLeap.

Una baldosa PowerLeap está diseñada para una vida útil de 20 o más años, y, el fabricante estima una recuperación de la inversión, en períodos de 3 a 5 años [34].

### 4.3 OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP

#### 4.3.1 Condiciones para la obtención de la característica

La caracterización de la señal de salida de la baldosa PowerLeap, se realizó bajo las siguientes condiciones:

- El individuo de prueba corresponde al estereotipo habitual en la ciudad de Loja, con un peso de 58 Kg, y, utiliza calzado deportivo común.
- Se mide la señal producida por un paso completo, con un apoyo sencillo sobre una baldosa.

Para la construcción de la característica de trabajo de la baldosa, se realizaron 20 experimentos. En cada uno de ellos, se registró 200 puntos. Cada punto se registra cada 0,05 s.



### 4.3.2 Instrumentación utilizada

Para la caracterización de la señal, se utilizó un multímetro tipo iDVM elaborado por la empresa Redfish Instruments, y, una página HTML basada en JAVA de PowerLeap, diseñada por Redfish para visualizar los resultados de gráficas y datos en una PC.

El multímetro iDVM (Ver Fig. 4.3) es reconocido por el Test and Measurement World para la excelencia en pruebas electrónicas y de medición, como ganador en su categoría 2012 [35]. Las características técnicas de este multímetro se resumen en la Tabla 4.1.

El multímetro iDVM, crea una conexión WI-FI para envió de los datos adquiridos a una PC, posteriormente mostrados en la página Web.



Fig. 4.3. Multímetro iDVM [36].



Tabla 4. 1. Características técnicas del multímetro idvm [36].

Función	Rango Absoluto	Resolución	Precisión
<b>Voltaje AC, RMS</b>	0-400 mV 0.4-4.00 V 4.00V-40.0 V 40.0V-300.0 V	0.1mV 0.1mV 1.0mV 10mV	2%
<b>Voltaje DC</b>	1.0-400 mV 0.4-4.00 V 4.00V-40.0 V 40.0V-300.0 V	0.1mV 0.1mV 1.0mV 10mV	2%
<b>Resistencia</b>	0.0-400 Ohms 400-4.0K Ohms 4.0K-40K Ohms 40K-400K Ohms 400K-4M Ohms	1.0 Ohm	1%
<b>Corriente AC</b>	0.1-400mA 0.400-4.0A	0.05mA	2%
<b>Corriente Dc</b>	0.1-400mA 0.400-4.0A	0.05mA	2%
<b>Continuidad</b>	Beeper on <25 Ohms y Beeper off > 250 Ohms		

### 4.3.3 Resultados preliminares

Los resultados obtenidos, permitieron construir una característica de trabajo para la baldosa como la mostrada en la Fig. 4.4, que relaciona voltaje y tiempo. La característica de trabajo está conformada por tres sectores. El primero muestra un pico de voltaje negativo, relacionado al momento en que el talón hace contacto con la baldosa. En el segundo, se realiza el apoyo plantar y medio sobre la baldosa, lo que genera un voltaje negativo menor, pero relativamente constante en un corto periodo de tiempo. En el tercero, se registra un pico de voltaje positivo correspondiente al momento de elevación del talón y despegue del pie.

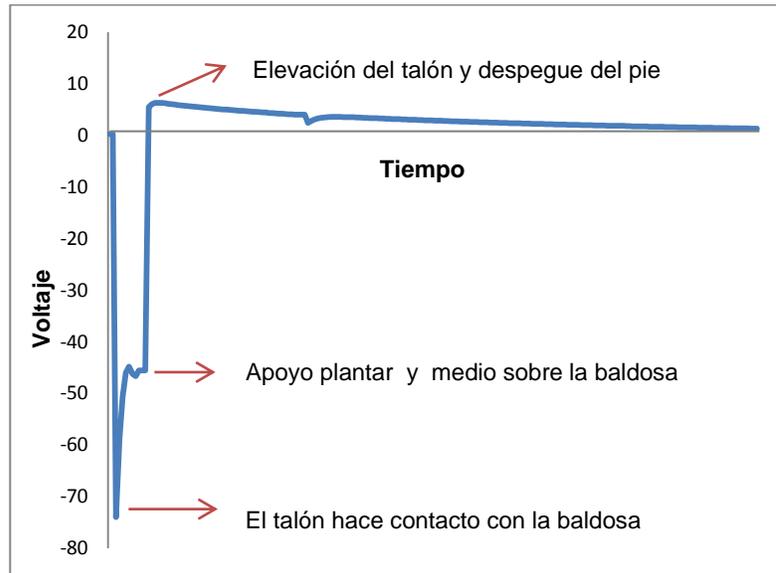


Fig. 4.4. Característica de trabajo de una baldosa PowerLeap.

La aparición de los picos positivos y negativos en la característica de trabajo de la baldosa, se relaciona con la diferencia de la polarización en el cristal al momento de deformarse y de recuperar su forma original, como lo muestra la Fig. 4.5 [37].

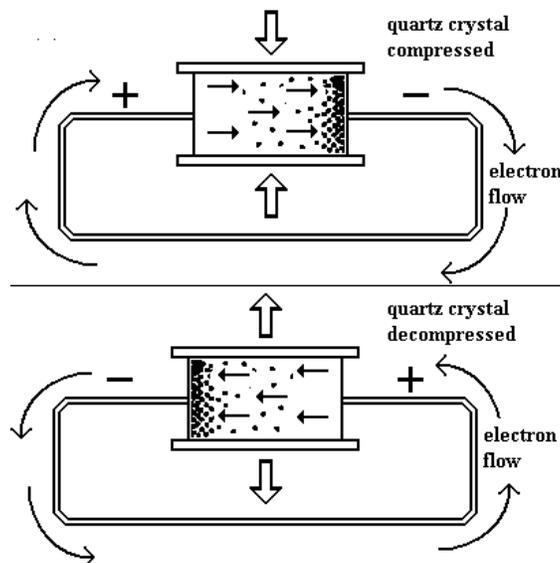


Fig. 4.5. Polarización del cristal piezoeléctrico durante su deformación y recuperación de la forma original [38].



#### 4.4 ANÁLISIS DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP

Para la explicación de la característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica, se decidió analizar a detalle los procesos en cada uno de los 3 sectores identificados previamente, correspondientes a las tres fases de un apoyo sencillo sobre la baldosa: el talón hace contacto con la baldosa, se realiza el apoyo plantar y medio, y, se despega y eleva el pie.

##### 4.4.1 Primer sector de la característica de trabajo: el talón hace contacto con la baldosa

La Fig. 4.6 muestra los resultados obtenidos en los 20 experimentos (diferenciados por colores). En el eje y, se muestran los valores de voltaje registrados. De la serie de 200 registros, 2 corresponden a este sector, y, se ubicaron en forma secuencial en el sistema de coordenadas. La gráfica se obtuvo al unir los puntos correspondientes a los 2 registros en la forma (V, t).

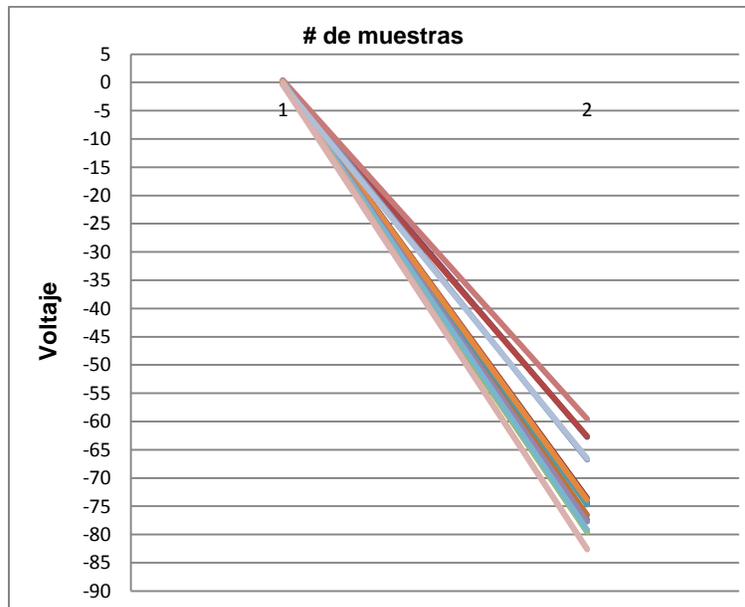


Fig. 4.6. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica en el sector en el que el talón hace contacto con la baldosa. *Software: Microsoft Excel.*



La gráfica obtenida muestra que el voltaje pico negativo que se puede alcanzar cuando el talón hace contacto con la baldosa, oscila entre -59,56 V y -82,59 V, con un promedio de -71,08 V.

#### 4.4.2 Segundo sector de la característica de trabajo: apoyo plantar y medio sobre la baldosa

La Fig. 4.7 muestra los resultados obtenidos para este sector de la característica de trabajo de la baldosa. Los puntos mostrados corresponden a los 13 registros siguientes en cada uno de los experimentos. Los resultados obtenidos muestran que el voltaje negativo asciende rápidamente a un valor promedio de -46,26 V (con extremos en -40 V y - 50 V), manteniéndose constante por 0,65 s como máximo, y, por 0,45 s como mínimo.

El apoyo plantar y medio sobre la baldosa dura en promedio 0,55 s, con una moda de 0,5 segundos.

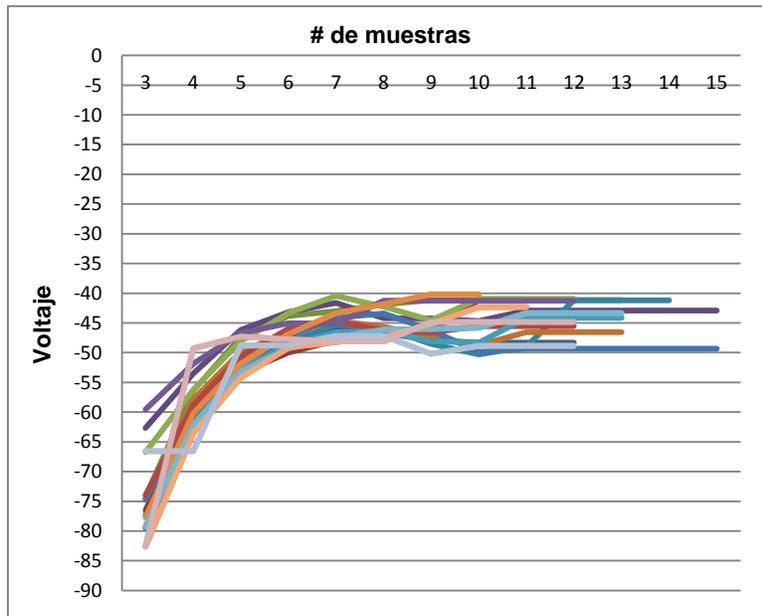


Fig. 4.7. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica en el sector en el que se realiza el apoyo plantar y medio sobre la baldosa. *Software: Microsoft Excel.*



#### 4.4.3 Tercer sector de la característica de trabajo: elevación del talón y despegue del pie

La Fig. 4.8 muestra los resultados obtenidos para este sector de la característica de trabajo de la baldosa. Los resultados obtenidos muestran que en el despegue y elevación del pie de la baldosa, se produce un voltaje positivo que oscila entre 6,6 V y 9,85 V, con un promedio de 7,45 V. Luego del pico positivo de voltaje, la señal desciende hasta cero.

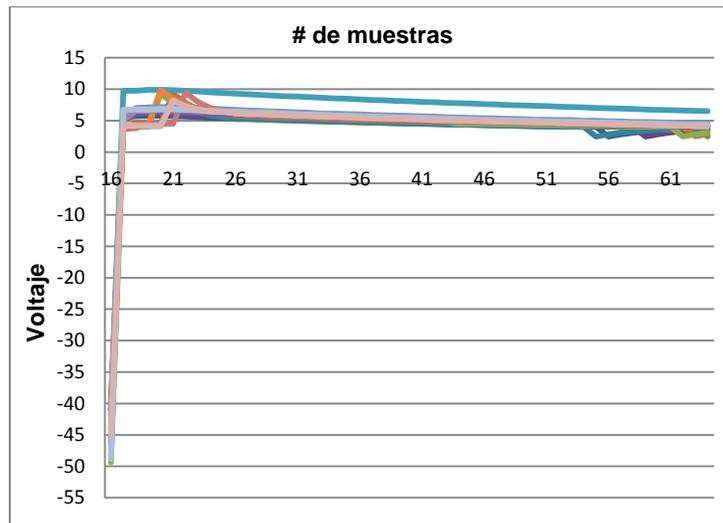


Fig. 4.8. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica en el sector en el que se produce la elevación del talón y despegue del pie. *Software: Microsoft Excel.*

Para determinar el tiempo en que el piezoeléctrico recupera su estado inicial, después del despegue del pie, se realizaron 10 pruebas, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.2. Se estableció que el tiempo de recuperación del piezoeléctrico es del orden de los 19,32 s.

Tabla 4.2. Tiempo de recuperación del piezoeléctrico

# Prueba	Tiempo (s)
1	19,05
2	17,66
3	18,27
4	18,56
5	18,26
6	18,96
7	23,23
8	20,89
9	18,52
10	19,88



#### 4.4.4 Análisis de los resultados obtenidos al variar la metodológica de obtención de la característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica

Como modificación a la metodología de obtención de la característica de trabajo de la baldosa, se consideró una en la que el individuo realiza sobre la baldosa las tres etapas de un apoyo sencillo (contacto del talón, apoyo plantar y medio, y, elevación y despegue del pie de la baldosa) con la diferencia de que, el apoyo plantar y medio se mantiene por un intervalo de tiempo mayor, antes del despegue del pie.

Los resultados obtenidos mostraron que el valor del voltaje negativo que aparece en el apoyo plantar y medio, desciende sostenidamente a lo largo del tiempo en que se mantiene el apoyo (ver Fig. 4.9). El tiempo máximo que puede mantenerse el apoyo plantar y medio sobre la baldosa es de 34 s, después de lo que el voltaje de salida es de 0 V.

Durante la elevación y despegue del pie, el valor del voltaje pico positivo aumenta, mientras mayor haya sido la duración del apoyo plantar y medio. Se obtuvieron valores positivos pico de hasta 60 V. El tiempo de recuperación del piezoeléctrico fue de 38,8 s.

En otro experimento, se observó la característica de salida de la baldosa como resultado de un salto sobre ella. Se registraron valores de 10 a 15 V en el impulso del salto, y, del orden de -100 a -110 V en la caída.

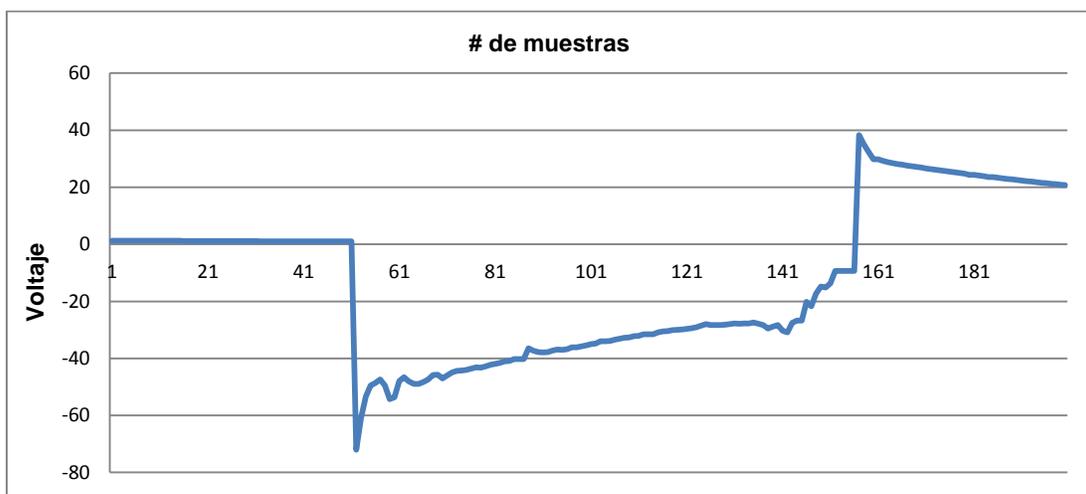


Fig. 4.9. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica obtenida para un apoyo plantar y medio sostenido. Software: Microsoft Excel.



## 4.5 RELACIÓN DE LOS VALORES EN LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA Y EL ESTEREOTIPO DEL SUJETO DE PRUEBA

### 4.5.1 Prueba de presión

Esta prueba se planteó para verificar si los parámetros de generación en el piezoeléctrico son independientes de la zona deformada en la baldosa. Para esto, la baldosa se zonificó en 5 áreas (ver Fig. 4.10).



Fig. 4.10. Zonificación de la baldosa piezoeléctrica para la prueba de presión.

Se realizaron 5 pruebas para cada área. Se consideró un sujeto de prueba de 59 Kg de peso, utilizando calzado deportivo común.

#### 4.5.1.1 Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 1 de la baldosa

La Fig. 4.11 muestra los resultados obtenidos en las cinco pruebas. El voltaje negativo que aparece al momento en que el talón hace contacto con la baldosa, fluctuó entre -64 y -70 V, con un promedio de -66,96 V. En el apoyo plantar y medio, se generaron voltajes entre -59 y -48 V, con un promedio de -53,18 V. El voltaje promedio en la elevación y despegue del pie fue de 6,33 V.



Fig. 4.11. Resultados de la prueba de presión (apoyo sencillo de un paso completo) en el área 1 de la baldosa PowerLeap. Software: Microsoft Excel.

#### 4.5.1.2 Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 2 de la baldosa

La Fig. 4.12 muestra los resultados obtenidos en las cinco pruebas. Al contacto del talón, y, en el apoyo plantar y medio sobre la baldosa, se registraron voltajes entre -37 y -44 V, con un promedio de -39 V. El voltaje promedio al momento de la elevación y el despegue del pie, fue de 7,98 V.

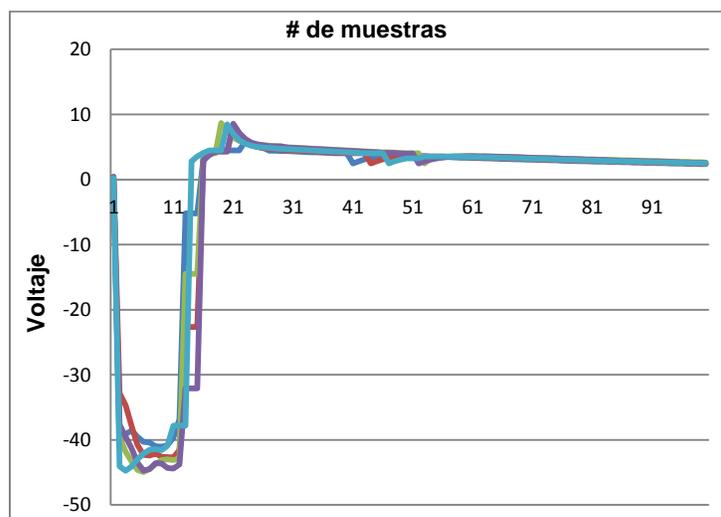


Fig. 4.12. Resultados de la prueba de presión (apoyo sencillo de un paso completo) en el área 2 de la baldosa PowerLeap. Software: Microsoft Excel.



#### 4.5.1.3 Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 3 de la baldosa

La Fig. 4.13 muestra los resultados obtenidos en las cinco pruebas. El voltaje negativo que aparece en el contacto del talón, fue de entre -53 y -68 V, con un promedio de -61,22 V. En el apoyo plantar y medio, se registró un ascenso del valor del voltaje hasta un promedio de -25,37 V. El voltaje promedio en la elevación y despegue del pie, fue de 4,08 V.

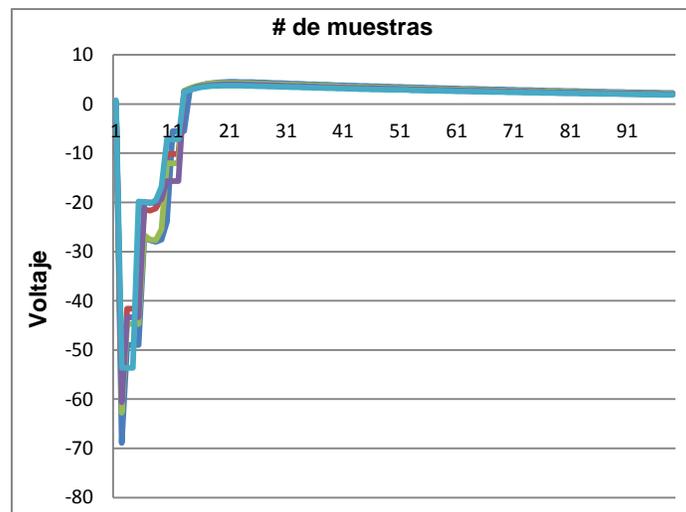


Fig. 4.13. Resultados de la prueba de presión (apoyo sencillo de un paso completo) en el área 3 de la baldosa PowerLeap. Software: Microsoft Excel.

#### 4.5.1.4 Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 4 de la baldosa

La Fig. 4.14 muestra los resultados obtenidos en las cinco pruebas. El voltaje negativo que aparece en el contacto del talón, fue de entre -77 y -83 V, con un promedio de -81,01 V. En el apoyo plantar y medio, el voltaje promedio fue de -45 V. En la elevación y despegue del pie, se registró un voltaje promedio de 6,8 V.

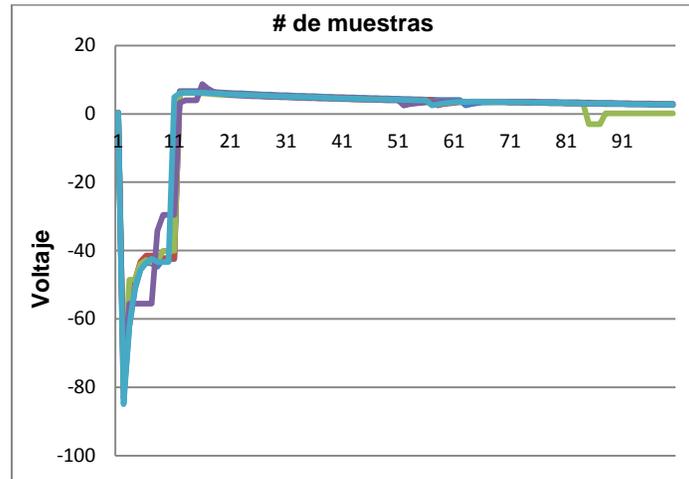


Fig. 4.14. Resultados de la prueba de presión (apoyo sencillo de un paso completo) en el área 4 de la baldosa PowerLeap. Software: Microsoft Excel.

#### 4.5.1.5 Resultados obtenidos para las pruebas de presión en el área 5 de la baldosa

La Fig. 4.15 muestra los resultados obtenidos en las cinco pruebas. El voltaje negativo que aparece en el contacto del talón fue de entre -74 y -84 V, con un promedio de -80,11 V. En el apoyo plantar y medio, el voltaje promedio registrado fue de -43.32 V. El voltaje promedio en la elevación y despegue del pie, fue de 6,6 V.

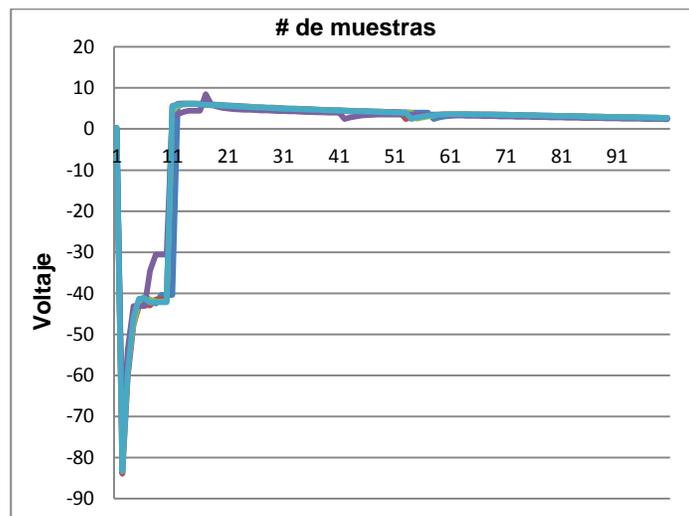


Fig. 4.15. Resultados de la prueba de presión (apoyo sencillo de un paso completo) en el área 5 de la baldosa PowerLeap. Software: Microsoft Excel.



#### 4.5.1.6 Discusión de resultados

En la tabla 4.3, se resume los resultados de las pruebas efectuadas. Los resultados obtenidos muestran que los mayores voltajes se producen al presionar las áreas 4 y 5, ubicadas en el centro de la baldosa. En las áreas 1 y 3, ubicadas en los bordes de la baldosa, los voltajes generados son similares entre sí en el contacto con el talón, pero no así en el apoyo plantar y medio.

Tabla 4.3. Resultados obtenidos en la prueba de presión en la baldosa Powerleap.

Área de la baldosa	Voltaje promedio de salida (V)		
	Contacto con el talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
1	-66,96	-53,18	6,33
2	-39,00	-39,00	7,98
3	-61,22	-25,37	4,08
4	-81,01	-45,00	6,80
5	-80,11	-43,32	6,60

En el área 2, no se distinguen las fases de contacto con el talón y de apoyo plantar, observándose un solo voltaje de -39 V. El voltaje en el despegue del pie, es el mayor registrado en todas las áreas.

#### 4.5.2 Prueba de la marcha humana

Para esta prueba se consideró el peso del sujeto de prueba. El tipo de calzado se restringió al uso de zapatos deportivos. La tabla 4.4 resume los resultados obtenidos, al aplicar el apoyo sencillo de un paso completo normal a la baldosa, en las áreas 4 y 5.



Tabla 4.4. Resultados obtenidos en la prueba de marcha humana sobre la baldosa Powerleap.

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	-67,30	-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	-63,04	9,40
1,78	116	-163,21	-79,77	13,15

Los resultados obtenidos muestran que el voltaje generado es directamente proporcional al peso del sujeto de prueba.

Se determinó que el voltaje en el contacto del talón con la baldosa, depende sólo del peso, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio y en la elevación y despegue del pie, depende tanto del peso como de la velocidad del paso. Una mayor velocidad de paso, generó un mayor voltaje en el apoyo plantar y medio, y, un menor voltaje en la elevación y despegue del pie.

También se determinó que mientras mayor tiempo se permanezca sobre la baldosa, mayor será el voltaje en la elevación y despegue del pie, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio descenderá más rápido.

#### 4.5.3 Prueba de ubicación

Esta prueba se ideó para determinar la mejor ubicación posible para una baldosa piezoeléctrica. Para esto, se comparó los resultados obtenidos al ubicar una baldosa en el piso (resultados anteriores), y, otra en el descanso de las escaleras (considerando la generación de energía tanto al subir como al bajar).

Las tablas 4.5 y 4.6, muestran los resultados obtenidos para una baldosa ubicada en el descanso de una escalera. Para la prueba se consideró las mismas variables que en la prueba de marcha humana. El voltaje generado al ascender y descender por una escalera, es mayor al que se puede obtener a través de una pisada en una baldosa



ubicada al nivel del piso. El voltaje generado en el contacto del talón con la baldosa, es mayor al descender por las escaleras.

Tabla 4.5. Resultados obtenidos en la prueba de ubicación de la baldosa Powerleap: descanso de escalera al subir.

Peso (Kg)	Voltaje promedio salida (V)		
	Contacto del talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
38	-47,84	-29,92	5,05
45	-59,72	-44,06	5,80
58	-82,27	-41,18	7,25
60	-84,18	-47,22	8,71
70	-107,32	-59,53	7,80
116	-149,83	-78,88	12,30

Tabla 4.6. Resultados obtenidos en la prueba de ubicación de la baldosa Powerleap: descanso de escalera al bajar.

Peso (Kg)	Voltaje promedio salida (V)		
	Contacto del talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
38	-53,33	-26,86	5,62
45	-69,76	-46,50	4,72
58	-96,54	-49,18	7,09
60	-91,93	-52,60	5,91
70	-102,47	-52,84	6,64
116	-153,62	-87,63	13,54

## 4.6 TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en el marco de este proyecto, podrán ser complementados con los generados por la prueba de carga de batería. Una vez conocido el voltaje promedio generado en una baldosa piezoeléctrica, se requiere aproximar el número de pasos requeridos para cargar totalmente una batería de ciclo profundo.

Completados los resultados, es pertinente plantear la implementación de proyectos aplicativos de las baldosas piezoeléctricas.



## CONCLUSIONES

- El efecto piezoeléctrico se presenta en cristales cuya estructura no tiene centro de simetría. Para estos cristales el efecto piezoeléctrico puede actuar de dos formas: el efecto piezoeléctrico directo y el efecto piezoeléctrico inverso.
- El efecto piezoeléctrico directo se da en los cristales que son sometidos con una tensión mecánica dando como resultado una polarización eléctrica. El efecto piezoeléctrico inverso se da en los cristales que son sometidos a un campo eléctrico, dando como resultado la deformación del cristal.
- Las constantes piezoeléctricas permiten describir la relación existente entre la fuerza aplicada, ya sean tensiones mecánicas o eléctricas, y la respuesta resultante del material piezoeléctrico. Esta relación depende de las propiedades piezoeléctricas de la cerámica, del tamaño y forma de la pieza, y de la dirección de excitación eléctrica y mecánica.
- Los materiales piezoeléctricos se basan en la curva de la histéresis dieléctrica para su clasificación. Los materiales tipo hard presentan una curva de histéresis cerrada de área pequeña y se caracterizan por su alta potencia. Los materiales tipo soft presentan una curva de histéresis abierta con área mayor y se caracterizan por su alta sensibilidad.
- Las desventajas que presentan los materiales piezoeléctricos son el envejecimiento, la variabilidad de las propiedades piezoeléctricas en función de la temperatura y el límite de excitación eléctrico y mecánico.
- CENELEC ha aprobado tres normas relacionadas a propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos y sus componentes, centrándose principalmente en definiciones, clasificaciones, métodos de medición, y, propiedades de baja y alta potencia.
- CENELEC está desarrollando dos pre-normas relacionadas a las definiciones, clasificación y métodos de medición de los actuadores de múltiples capas, y, una pre-norma relacionada a las propiedades de películas gruesas piezoeléctricas.
- IEC es la organización internacional encargada de elaborar normas para la industria de la electrotecnia. Los comités técnicos y subcomisiones que se encargan de mantener estas normas son el comité IEC TC49 que está a cargo de



la normalización de dispositivos piezoeléctricos, y, dieléctricos para control y selección de frecuencia, el comité TC87 que está a cargo de la normalización en el área de ultrasonido, y, la subcomisión 47E del comité IEC SC47 que está a cargo de la normalización de dispositivos semiconductores discretos.

- Otros estándares se han desarrollado bajo el auspicio de grupos u organizaciones como: IEEE-UFFC, US military Standars, VAMAS, EIA, y, Electronic Materials Manufacturers Association of Japan para la industria de los materiales piezoeléctricos.
- El funcionamiento de las baldosas piezoeléctricas se basan en el efecto piezoeléctrico directo.
- El método de recolección piezoeléctrica utilizado por las baldosas es el modo de compresión d33 que permite obtener una mayor potencia debido a las características naturales del efecto piezoeléctrico.
- La cinesiología describe la marcha humana como un proceso, enfocándose principalmente en el ciclo y la biomecánica de la marcha, las fuerzas de reacción que el pie recibe al momento del contacto con el suelo y las presiones plantares, todo esto desde una perspectiva mecánica.
- Para el harvesting de energía de la marcha en las baldosas piezoeléctricas es necesario tres etapas básicas que son el generador piezoeléctrico, el rectificador y el dispositivo de almacenamiento.
- Al ejercer presión sobre las baldosas, sus placas metálicas se desplazan perpendicularmente, provocando una deformación del material piezoeléctrico incrustado entre las placas, con lo cual se transforma energía mecánica en eléctrica.
- El voltaje y la corriente a la salida de las baldosas piezoeléctricas son transitorios, y, deben ser convertidos en una señal continua para su posterior almacenamiento, a través de un rectificador.
- Se emplean dispositivos de almacenamiento temporales, tales como capacitores, supercapacitores, y, dispositivos de menor tasa de autodescarga como las baterías recargables.
- La característica de trabajo de las baldosas piezoeléctricas PowerLeap se conforma por tres sectores. El primero muestra un pico de voltaje negativo,



relacionado al momento en que el talón hace contacto con la baldosa. En el segundo, se realiza el apoyo plantar y medio sobre la baldosa, lo que genera un voltaje negativo menor, pero relativamente constante en un corto periodo de tiempo. En el tercero, se registra un pico de voltaje positivo correspondiente al momento de elevación del talón y despegue del pie.

- Con un sujeto de prueba de 58 Kg, el voltaje pico negativo cuando el talón hace contacto con la baldosa es en promedio de -71,08 V. En el apoyo plantar y medio, el voltaje negativo asciende rápidamente a un valor promedio de -46,26V, con una duración promedio de 0,55 s. En el despegue y elevación del pie de la baldosa, se produce un voltaje positivo promedio de 7,45 V; mientras que el tiempo de recuperación del piezoeléctrico es del orden de los 19,32 s.
- La prueba de presión sobre la baldosa piezoeléctrica permitió distinguir zonas en las que la generación es mayor. Los resultados mostraron que las zonas 4 y 5, ubicadas en el centro de la baldosa, generan mayores voltajes. En las áreas 1 y 3, ubicadas en los bordes de la baldosa, los voltajes generados son menores con respecto a las áreas 4 y 5, y, son similares entre sí en el contacto con el talón, pero no así en el apoyo plantar y medio. En el área 2, no se distinguen las fases de contacto con el talón y de apoyo plantar, observándose un solo voltaje negativo, siendo el menor con respecto a las demás áreas, mientras que el voltaje en el despegue del pie, es el mayor registrado en todas las áreas.
- Los resultados de la prueba de marcha humana mostraron que el voltaje generado es directamente proporcional al peso del sujeto de prueba. Se determinó que el voltaje en el contacto del talón con la baldosa, depende sólo del peso, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio y en la elevación y despegue del pie, depende tanto del peso como de la velocidad del paso.
- Las pruebas de marcha humana también mostraron que una mayor velocidad de paso, genera un mayor voltaje en el apoyo plantar y medio, y, un menor voltaje en la elevación y despegue del pie.
- Las pruebas de marcha humana mostraron que mientras mayor tiempo se permanezca sobre la baldosa, mayor será el voltaje en la elevación y despegue del pie, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio descenderá más rápido.



- La prueba de ubicación mostró que el voltaje generado al ascender y descender por una escalera, es mayor al que se puede obtener a través de una pisada en una baldosa ubicada al nivel del piso. El voltaje generado en el contacto del talón con la baldosa, es mayor al descender por las escaleras.



## REFERENCIAS

- [1] Physical Basis, [Online]. Disponible en: <http://www.morgantechnicalceramics.com/download.php?type=document&document=126> [Consulta: Mayo 2012]
- [2] Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades, [Online]. Disponible en: [http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/RT-ATCP-01-\[ES\].pdf](http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/RT-ATCP-01-[ES].pdf) [Consulta: Mayo 2012]
- [3] Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico, [Online]. Disponible en: <http://www.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/piezolectricidad.pdf> [Consulta: Mayo 2012]
- [4] Piezoelectrics in Positioning. Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications, [Online]. Disponible en: [http://www.physikinstrumente.com/en/pdf\\_extra/2009\\_PI\\_Piezo\\_University\\_Designing\\_with\\_Piezo\\_Actuators\\_Tutorial.pdf](http://www.physikinstrumente.com/en/pdf_extra/2009_PI_Piezo_University_Designing_with_Piezo_Actuators_Tutorial.pdf) [Consulta: Junio 2012]
- [5] Piezo Systems. Introduction to piezoelectricity, [Online]. Disponible en: <http://www.piezo.com/catalog7C.pdf> [Consulta: Junio 2012]
- [6] Ferroperm Piezoceramics, [Online]. Disponible en: [http://www.biox.kth.se/martin.wiklund/ultrasound/Ferroperm\\_product\\_parameters.pdf](http://www.biox.kth.se/martin.wiklund/ultrasound/Ferroperm_product_parameters.pdf) [Consulta: Junio 2012]
- [7] ATCP do Brasil. Documento 3 de la fase 1. Materiales Piezoeléctricos, [Online]. Disponible en: <http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf> [Consulta: Junio 2012]
- [8] Piezoelectric Ceramics, [Online]. Disponible en: [http://www.polytecpi.com/PDF/Piezoelectric\\_Ceramics.pdf](http://www.polytecpi.com/PDF/Piezoelectric_Ceramics.pdf) [Consulta: Junio 2012]
- [9] High Power Hard PZT, [Online]. Disponible en: <http://www.morganelectroceramics.com/materials/piezoelectric/high-power-hard-pzt/> [Consulta: Junio 2012]
- [10] Piezoelectric Ceramics. MORGAN, [Online]. Disponible en: <http://www.morganelectroceramics.com/download.php?525a45634742566a533851336b524b5176316e582f552b4a487058464347712f6a464b786363425466776d4f45464b716941367a35632b6b775247666a56356d536f343d> [Consulta: Junio 2012]
- [11] Introduction to Piezo Transducers, [Online]. Disponible en: <http://www.piezo.com/catalog7C.pdf> [Consulta: Junio 2012]
- [12] Project: EN 50324-1:2002, [Online]. Disponible en: [http://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:7780843362400651:::FSP\\_PROJECT,FSP\\_LANG\\_ID:1705,25](http://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:7780843362400651:::FSP_PROJECT,FSP_LANG_ID:1705,25) [Consulta: Julio 2012]



- [13] Standards for piezoelectric ceramic materials, [Online]. Disponible en: <http://www.piezoinstitute.com/standards/index.php> [Consulta: Julio 2012]
- [14] Project: EN 50324-2:2002, [Online]. Disponible en: [http://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:2364068372797819::::FSP\\_PROJECT,FSP\\_LANG\\_ID:7541,25](http://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:2364068372797819::::FSP_PROJECT,FSP_LANG_ID:7541,25) [Consulta: Julio 2012]
- [15] Project: EN 50324-3:2002, [Online]. Disponible en: [http://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:4277638462262567::::FSP\\_PROJECT,FSP\\_LANG\\_ID:7542,25](http://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:4277638462262567::::FSP_PROJECT,FSP_LANG_ID:7542,25) [Consulta: Julio 2012]
- [16] POWERleap Product [Consulta: Agosto 2012]
- [17] Wei Ch., Ramasamy G. A Hybrid Energy Harvesting System for Small Battery Powered Applications. [Consulta: Agosto 2012]
- [18] The piezoelectric Effect, [Online]. Disponible en: <http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf> [Consulta: Agosto 2012]
- [19] Capítulo 3. Biomecánica de la marcha humana [Online]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_s\\_f/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_s_f/capitulo3.pdf) [Consulta: Agosto 2012]
- [20] Capítulo 2. Marcha normal, [Online]. Disponible en: [http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion/marcha\\_normal.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion/marcha_normal.pdf) [Consulta: Agosto 2012]
- [21] 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]
- [22] Tema 1: Calzado Deportivo, [Online]. Disponible en: <http://www.uclm.es/profesorado/xaguado/ASIGNATURAS/BTD/4-Apuntes/Clase3%BA-01.pdf> [Consulta: Agosto 2012]
- [23] Estudio dinámico de la presión en el pie: podobarografía, [Online]. Disponible en: <http://www.sediabetes.org/resources/revista/00011075archivoarticulo.pdf> [Consulta: Agosto 2012]
- [24] Annie E. Edward S. Allwyn A. Performance Evaluation of Different Rectifiers for Piezo-electric Energy Harvesting Applications. [Consulta: Noviembre 2012]
- [25] Modelación y estudio de un microgenerador de energía con láminas piezoeléctricas. [Consulta: Noviembre 2012]
- [26] Circuitos Rectificadores, [Online]. Disponible en: [http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula\\_virtual/Cursos/Instrumentacion%20I/Documentos/Circuitos\\_Rectificadores.pdf](http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos/Instrumentacion%20I/Documentos/Circuitos_Rectificadores.pdf)
- [27] Rectificador de onda completa en puente, [Online]. Disponible en: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec\\_basica/tema4/Paginas/Pagina5.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basica/tema4/Paginas/Pagina5.htm) [Consulta: Noviembre 2012]



- [28] Ottman, G.K., Hoffman, H.F., Lesieutre, G.A. Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Step- down Converter in Discontinuous Conduction Mode. [Consulta: Noviembre 2012]
- [29] Chang Ko Wei, Gobbi Ramasamy. A Hybrid Energy Harvesting System for Small Battery Powered Applications. [Consulta: Noviembre 2012]
- [30] Mahidur R. Sarker, Sawal H, Ali, Masuri Othman, Shabiul Islam. Designing a Low Voltage Energy Harvesting Circuits for Rectified Storage Voltage Using Vibrating Piezoelectric. . [Consulta: Noviembre 2012]
- [31] Sodano H., Park G, Inman D. An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications, [en línea]. Disponible en: <http://www.me.mtu.edu/~hsodano/Publications/MSSP%202003%20MFC%20Applications.pdf> [Consulta: Octubre 2012]
- [32] Lloyd J. Electrical Properties of Macro-Fiber Composite Actuators and Sensors, [en línea]. Disponible en: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07092004-123926/unrestricted/Thesis.pdf> [Consulta: Octubre 2012]
- [33] Kapton polyimide film, [en línea]. Disponible en: [http://www2.dupont.com/Kapton/en\\_US/](http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/) [Consulta: Octubre 2012]
- [34] Harvest Energy, [en línea]. Disponible en: <http://www.powerleap.net> [Consulta: Septiembre 2012]
- [35] T&MW announces winners of 2012 Best in Test awards, [en línea]. Disponible en: <http://www.tmworld.com/electronics-news/4389453/-em-T-amp-MW-em-announces-winners-of-2012-Best-in-Test-awards> [Consulta: Septiembre 2012]
- [36] REDFISH INSTRUMENTS, [en línea]. Disponible en: <http://www.redfishinstruments.com/products/iDVM/>. [Consulta: Septiembre 2012]
- [37] Piezoelectricidad, [en línea]. Disponible en: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicalInteractiva/sacaleE\\_M2/Piezoelectricidad/Piezoelctricidad.htm](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicalInteractiva/sacaleE_M2/Piezoelectricidad/Piezoelctricidad.htm) [Consulta: Octubre 2012]
- [38] Piezoelectricidad, [en línea]. Disponible en: [http://migyanesfertecno.blogspot.com/2012\\_01\\_01\\_archive.html](http://migyanesfertecno.blogspot.com/2012_01_01_archive.html) [Consulta: Octubre 2012]



## **ANEXOS**

**PAPER: ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON LA UTILIZACIÓN DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS**

# Análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la utilización de baldosas piezoeléctricas

V. Merino<sup>#1</sup>, J. Jaramillo<sup>#2</sup>

<sup>#1</sup>Profesional en formación de la EET, Universidad Técnica Particular de Loja

<sup>#2</sup>Docente Investigador de la EET, Universidad Técnica Particular de Loja  
Loja, Ecuador 2012

<sup>#1</sup>vamerino@utpl.edu.ec

<sup>#2</sup>jorgeluis@utpl.edu.ec

**Resumen**—Este artículo presenta una breve descripción acerca de la piezoelectricidad, describe el funcionamiento de las baldosas piezoeléctricas, explica las generalidades de la cinésiología de la marcha humana, describe la estructura de una baldosa piezoeléctrica tipo PowerLeap, y, detalla la obtención de la característica de trabajo de la baldosa

**Palabras clave**— baldosa PowerLeap, característica de trabajo, marcha humana, piezoelectricidad.

## I. INTRODUCCIÓN

El concepto de energy harvesting se basa en la recolección, transformación, y, almacenamiento de energía proveniente de fuentes naturales, en procesos en los que generalmente esta se disipa. Entre los dispositivos de mayor utilización en el harvesting de energía, un lugar especial lo ocupan los basados en el efecto piezoeléctrico.

En este trabajo se explica la naturaleza de la piezoelectricidad y se describe el funcionamiento de las baldosas piezoeléctricas como instrumento para el harvesting de energía.

## II. PIEZOELECTRICIDAD

### A. Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico fue descubierto por Jacques y Pierre Curie, en 1880. Ciertos cristales sometidos a una tensión mecánica, se polarizaban eléctricamente (efecto piezoeléctrico directo). Esos mismos materiales se deformaban al ser expuestos a un campo eléctrico (efecto piezoeléctrico inverso) [1].

El efecto piezoeléctrico se presenta en cristales cuya estructura no tiene centro de simetría (Ver Fig. 1). La tensión (tracción, o, compresión) aplicada al cristal, altera la posición relativa de los centros de carga positiva y negativa en cada célula elemental, y, conduce a una polarización neta en la superficie del cristal. El efecto es prácticamente lineal, la polarización varía directamente con la tensión aplicada, y, es dependiente de la dirección. Las tensiones de compresión y tracción generan campos eléctricos (y por lo tanto voltajes) de

polaridad opuesta. El efecto es recíproco, de modo que si el cristal está expuesto a un campo eléctrico, se experimenta una deformación elástica, por lo que la longitud puede aumentar o disminuir, de acuerdo con la polaridad del campo [1].

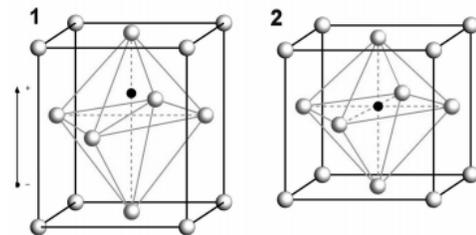


Fig. 1. Estructura de las cerámicas piezoeléctricas PZT. 1) Debajo de la temperatura de Curie. 2) Por encima de la temperatura de Curie [2].

### B. Histéresis dieléctrica

El ciclo de histéresis dieléctrica muestra el efecto del campo eléctrico sobre la polarización y sobre la alineación de los dipolos (Ver Fig.2).

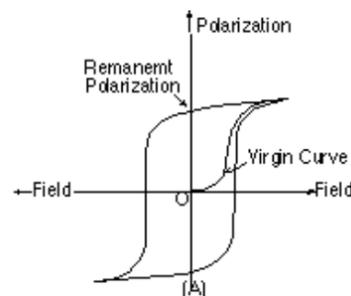


Fig. 2. Histéresis piezoeléctrica [3].

### C. Clasificación de los materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se clasifican en dos grupos: hard y soft. Esta clasificación se basa en la curva de la histéresis dieléctrica. Los materiales de alta potencia (hard) presentan una curva de histéresis cerrada de área pequeña. Los materiales de alta sensibilidad (soft), presentan una curva de histéresis abierta con área mayor.

### Materiales tipo hard

Estos materiales operan a altas tensiones eléctricas y mecánicas, sin que sus condiciones piezoeléctricas cambien sustancialmente, por lo cual resultan idóneos para aplicaciones de alta potencia [4].

Poseen una moderada permitividad, un gran factor de acoplamiento piezoeléctrico, una buena estabilidad bajo altas tensiones mecánicas y campos de operación, y, bajas pérdidas dieléctricas [4].

Estos materiales se utilizan en la limpieza por ultrasonidos, en el campo médico (instrumentos quirúrgicos), y, en la tecnología del sonar [4], y, existen dos clases: materiales **Navy Type I**, y **Navy Type III**.

### Materiales tipo soft

Estos materiales poseen un alto valor para la constante de carga piezoeléctrica, permitividad moderada, y, altos valores de acoplamiento [4]. Bajo condiciones de alta transmisión, estos materiales son susceptibles al calentamiento espontáneo más allá de su rango de temperatura de funcionamiento.

Estos materiales se utilizan como elementos de transmisión, sensores de vibración, hidrófonos, aplicaciones que requieren altas energías, y, alto diferencial de potencial, y en aplicaciones que requieren grandes deformaciones mecánicas, como posicionadores y actuadores, existen cuatro clases: materiales **Navy Type II**, **Navy Type IV**, **Navy Type V**, y, **Navy Type VI**.

#### *D. Limitaciones de los materiales piezoeléctricos*

Con el tiempo, la polarización remanente inducida durante el proceso de fabricación de la cerámica se desvanece naturalmente, independientemente de los agentes externos o del uso del material [3], este efecto es conocido como envejecimiento.

Las constantes dieléctricas, las constantes de carga piezoeléctrica, y, el factor de calidad Q, son afectados por la temperatura. En el caso de las cerámicas, la afectación de la temperatura es más intensa e impredecible, debido a la complejidad de los mecanismos del efecto piezoeléctrico [3].

De igual forma, las cerámicas piezoeléctricas son materiales frágiles poco resistentes a la tracción, siendo importante observar los límites de cada material para evitar rupturas [3].

### III. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS

Las baldosas piezoeléctricas aprovechan el efecto piezoeléctrico directo. Constructivamente, en la baldosa se coloca dos placas de aluminio, separadas de 4 a 10 mm, y, con la capacidad de desplazarse una respecto de otra, al ser pisadas. En medio de las placas, se ubica una pastilla de material piezoeléctrico (ver Fig. 3).

Al ejercer presión sobre la baldosa, las placas se desplazan y accionan el material piezoeléctrico, en el que la energía mecánica se convierte en energía eléctrica. El método de recolección que las baldosas piezoeléctricas utilizan es el modo de compresión  $d_{33}$  (Ver Fig. 4) [5], [6].

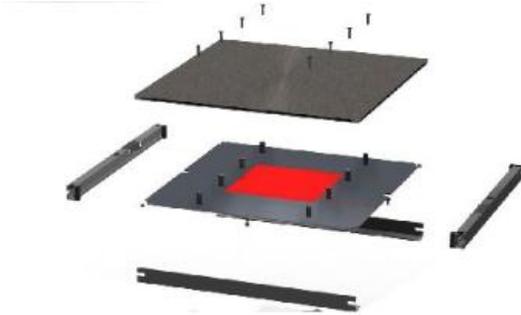


Fig. 3. Esquema mecánico y piezoeléctrico de una baldosa piezoeléctrica. El material piezoeléctrico está colocado entre dos placas de aluminio [7].

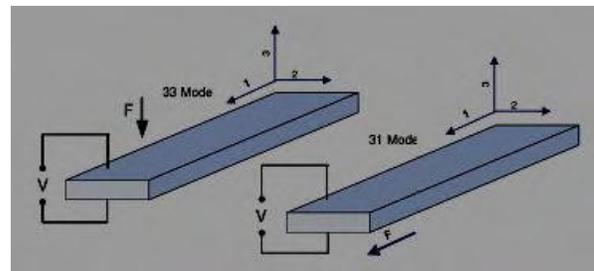


Fig. 4. Modos de recolección piezoeléctrica. Modo  $d_{33}$  y  $d_{31}$  [5].

### IV. CINESIOLOGÍA DE LA MARCHA HUMANA

La cinesiólogía describe la marcha humana como un proceso, desde una perspectiva mecánica.

#### *A. El ciclo de la marcha*

El ciclo de la marcha comienza cuando un pie hace contacto con el suelo, y, termina con el siguiente contacto del mismo pie. A la distancia entre estos dos puntos de contacto con el suelo, se le llama un paso completo [8].

El ciclo de la marcha consta de dos componentes, conocidos como la fase de apoyo (cuando una pierna está en contacto con el suelo), y, la fase de balanceo (cuando la pierna no contacta con el suelo) [8]. Durante la marcha, estas dos fases se alternan de una pierna a la otra.

En un paso completo, el apoyo sencillo se refiere al período cuando sólo una pierna está en contacto con el suelo.

El período de doble apoyo, ocurre cuando ambos pies están en contacto con el suelo, simultáneamente (ver Fig. 5). La diferencia entre correr y caminar es la ausencia de un período de doble apoyo [8].

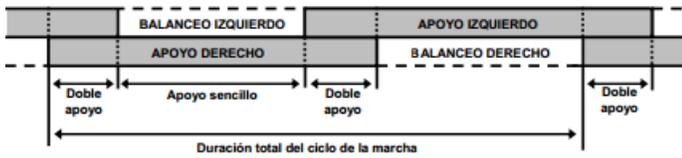


Fig. 5. Fases del ciclo de la marcha [8].

A velocidad normal, durante el ciclo de la marcha, el 60% del tiempo se relaciona a la fase de apoyo, y, un 40% a la fase de balanceo. Del tiempo empleado en la fase de apoyo, un 20% corresponde al doble apoyo [9].

La fase de apoyo está dividida en cinco intervalos (ver Fig. 6). [9]: Contacto del talón, apoyo plantar, apoyo medio, elevación del talón, y, despegue del pie.

El intervalo de aceptación del peso empieza en el contacto del talón y termina con el apoyo plantar. El intervalo de apoyo medio empieza con el apoyo plantar y termina con la elevación del talón. El despegue se extiende desde la elevación del talón al despegue de los dedos [9] (Ver Fig. 6).

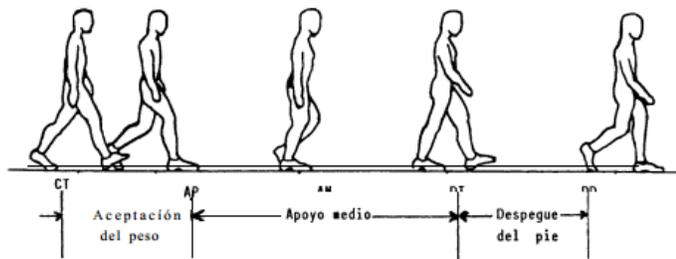


Fig. 6. Intervalos de la fase de apoyo. CT: contacto del talón, AP: apoyo plantar, AM: Apoyo medio, ET: Elevación del talón, DP: Despegue del pie. Intervalos: Aceptación del peso, Apoyo medio y Despegue del pie [9].

La fase de balanceo se divide en tres intervalos [8]: **Aceleración**, que se caracteriza por la rápida aceleración del extremo de la pierna inmediatamente después que los dedos dejan el suelo. **Balanceo medio**, cuando la pierna en movimiento rebasa a la pierna de apoyo como un péndulo. **Desaceleración**, cuando la pierna desacelera al acercarse al final del intervalo (Ver Fig. 7).

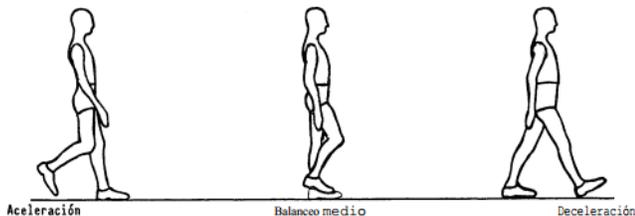


Fig. 7. Intervalos de la fase de balanceo: aceleración, balanceo medio, y, desaceleración [9].

### Fuerzas de reacción

Durante la marcha, aparecen fuerzas de reacción como las denominadas **fuerzas  $F_x$** , que actúan en el eje antero-posterior, **fuerzas  $F_y$** , que actúan en el eje medio-lateral, y, **fuerzas  $F_z$** , que actúan en el eje vertical [10]. Al estudiar el

sistema resultante de fuerzas en la baldosa piezoeléctrica, se considerará que las fuerzas  $F_x$  y  $F_y$  son nulas.

En marcha y en carrera, aparecen dos picos o crestas de  $F_z$ , y, entre ellos un valle. La primera cresta, se denomina *pico de frenado o de impacto*, y, la segunda, *pico de aceleración o de impulso* (ver Fig. 8).

En la marcha, ambos picos alcanzan un valor similar, en torno a 1,2 veces el peso de la persona (BW) [10]. En la carrera, a medida que aumenta la velocidad, disminuye el tiempo de apoyo, los picos se acercan en el tiempo, aumentan los valores de los picos, y de a poco predomina el pico de impacto. Con una gran velocidad, el pico de aceleración puede incrustarse en el pico de impacto. En la carrera de fondo, el pico de impacto puede alcanzar valores de 2 BW; en la carrera de velocidad puede alcanzar 3BW; y, en la caída de un rebote al practicar baloncesto puede llegar hasta 5BW [10].

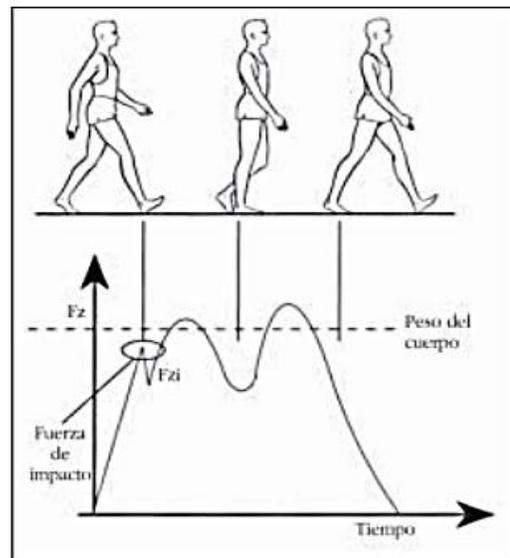


Fig. 8. Distribución de fuerzas verticales que se producen al caminar. La curva vertical  $F_z$  al caminar típicamente aparecen dos picos: el primero, durante el contacto del talón y el segundo, durante el impulso [11].

## V. HARVESTING DE ENERGÍA DE LA MARCHA A TRAVÉS DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS

La Fig. 9, muestra un esquema de las etapas básicas del harvesting de energía de la marcha humana, a través de baldosas piezoeléctricas.

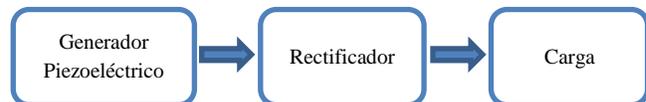


Fig. 9. Diagrama de bloques básico para el harvesting de energía de la marcha en las baldosas piezoeléctricas [12].

### A. Generador piezoeléctrico

Al pisar las baldosas piezoeléctricas, se ejerce una presión sobre las placas de aluminio que se desplazan perpendicularmente. Este esfuerzo mecánico se transmite al material piezoeléctrico en medio de las placas, que se

deforma. Con esto, la posición de los centros de carga positiva y negativa de cada célula elemental del cristal piezoeléctrico se altera, y, como resultado se obtiene carga eléctrica.

### B. Rectificador

El voltaje y la corriente a la salida de las baldosas piezoeléctricas, son transitorios. Con ayuda de un rectificador, se obtiene una señal continua [13].

Es posible colocar un capacitor en paralelo, a la salida del rectificador, para mantener el voltaje de salida en un estado de equilibrio después de alcanzar su máximo valor. Esto se logra ya que el condensador se carga hasta cierto nivel antes de realizar la descarga al dispositivo de almacenamiento [14].

### C. Carga

La energía eléctrica generada es almacenada en condensadores, supercapacitores, o, baterías recargables (litio-ion y níquel-cadmio).

La Fig. 10 muestra un esquema del circuito para el harvesting de energía a través de una baldosa piezoeléctrica. La fuente de corriente y el capacitor en paralelo, representan al generador piezoeléctrico.

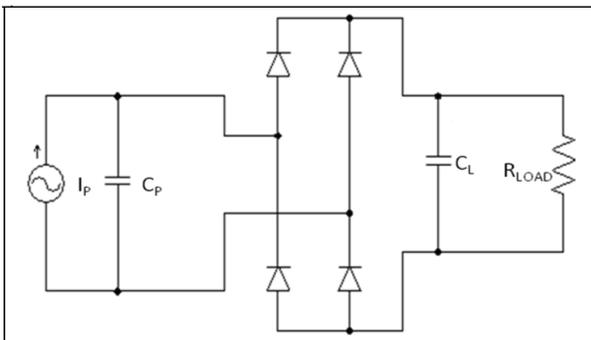


Fig. 10. Circuito de harvesting de energía [12].

La energía almacenada se puede utilizar para proveer a dispositivos de bajo consumo, como iluminación LED, pantallas y señalización, redes de sensores, dispositivos celulares, alarmas, entre otros.

## VI. DESCRIPCIÓN DE UNA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP

Constructivamente, una baldosa piezoeléctrica de PowerLeap (ver Fig. 11), está montada sobre una estructura de aluminio de 3 cm de altura, 50 cm de ancho, y, 50 cm de largo, que soporta hasta 100 KN de peso. Sobre esta estructura, se disponen dos placas metálicas de aluminio de 3 y 4 mm de espesor, que pueden desplazarse hasta 5 mm en toda su superficie (al ser pisadas). En medio de las dos placas, se encuentra incrustado el material piezoeléctrico.



Fig. 11. Baldosa PowerLeap, con placa personalizada.

El material piezoeléctrico utilizado, es un compuesto de macrofibras piezoeléctricas (MFC), que consta de finas fibras PZT incrustadas en una película polimérica adhesiva, y, cubierto con un patrón de electrodos interdigitados [15].

El MFC presenta un coeficiente de acoplamiento electromecánico mayor, y, produce una fuerza y un desplazamiento mayor que cualquier otro compuesto piezoeléctrico [15]. Una baldosa PowerLeap, aloja un MFC de 8.4 cm de largo, y, de 8.3 cm de ancho, polarizado en paralelo (Ver Fig. 12).



Fig. 12. Compuesto de macrofibras incrustado en el interior de la baldosa PowerLeap.

## VII. OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP

### A. Condiciones para la obtención de la característica

La caracterización de la señal de salida de la baldosa PowerLeap, se realizó bajo las siguientes condiciones:

- El individuo de prueba corresponde al estereotipo habitual en la ciudad de Loja, con un peso de 58 Kg, y, utiliza calzado deportivo común.
- Se mide la señal producida por un paso completo, con un apoyo sencillo sobre una baldosa.

Para la construcción de la característica de trabajo de la baldosa, se realizaron 20 experimentos. En cada uno de ellos, se registró 200 puntos. Cada punto se registra cada 0,05s.

## B. Resultados preliminares

Los resultados obtenidos, permitieron construir una característica de trabajo para la baldosa como la mostrada en la Fig. 13, que relaciona voltaje y tiempo. La característica de trabajo está conformada por tres sectores. El primero muestra un pico de voltaje negativo, relacionado al momento en que el talón hace contacto con la baldosa. En el segundo, se realiza el apoyo plantar y medio sobre la baldosa, lo que genera un voltaje negativo menor, pero relativamente constante en un corto periodo de tiempo. En el tercero, se registra un pico de voltaje positivo correspondiente al momento de elevación del talón y despegue del pie.

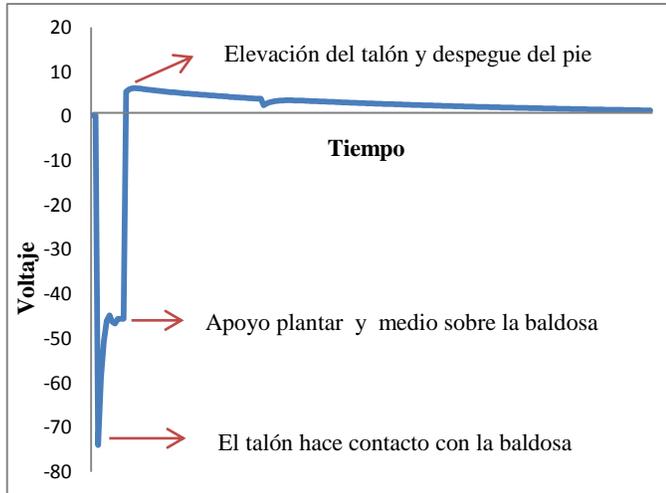


Fig. 13. Característica de trabajo de una baldosa PowerLeap.

### VIII. ANÁLISIS DE LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA TIPO POWERLEAP

Para la explicación de la característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica, se decidió analizar a detalle los procesos en cada uno de los 3 sectores identificados previamente, correspondientes a las tres fases de un apoyo sencillo sobre la baldosa: el talón hace contacto con la baldosa, se realiza el apoyo plantar y medio, y, se despega y eleva el pie.

#### Primer sector de la característica de trabajo: el talón hace contacto con la baldosa

La Fig. 14 muestra los resultados obtenidos en los 20 experimentos (diferenciados por colores). En el eje y, se muestran los valores de voltaje registrados. De la serie de 200 registros, 2 corresponden a este sector, y, se ubicaron en forma secuencial en el sistema de coordenadas. La gráfica se obtuvo al unir los puntos correspondientes a los 2 registros en la forma (V, t).

La gráfica obtenida muestra que el voltaje pico negativo que se puede alcanzar cuando el talón hace contacto con la baldosa, oscila entre -59,56 V y -82,59 V, con un promedio de -71,08 V.

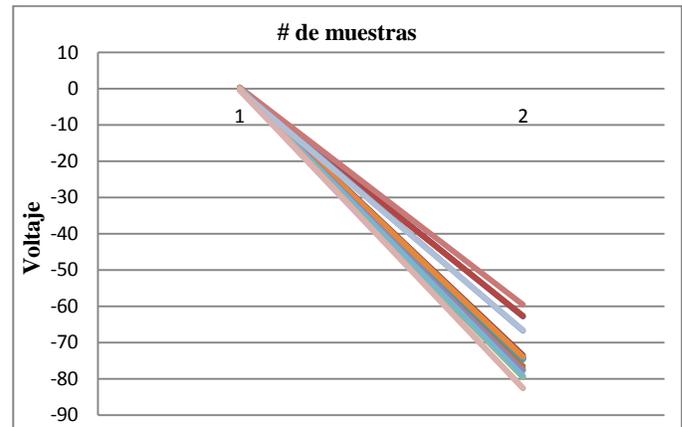


Fig. 14. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica en el sector en el que el talón hace contacto con la baldosa.

#### Segundo sector de la característica de trabajo: apoyo plantar y medio sobre la baldosa

La Fig. 15 muestra los resultados obtenidos para este sector de la característica de trabajo de la baldosa. Los puntos mostrados corresponden a los 13 registros siguientes en cada uno de los experimentos. Los resultados obtenidos muestran que el voltaje negativo asciende rápidamente a un valor promedio de -46,26V (con extremos en -40V y -50V), manteniéndose constante por 0,65 s como máximo, y, por 0,45s como mínimo.

El apoyo plantar y medio sobre la baldosa dura en promedio 0,55 s, con una moda de 0,5 segundos.

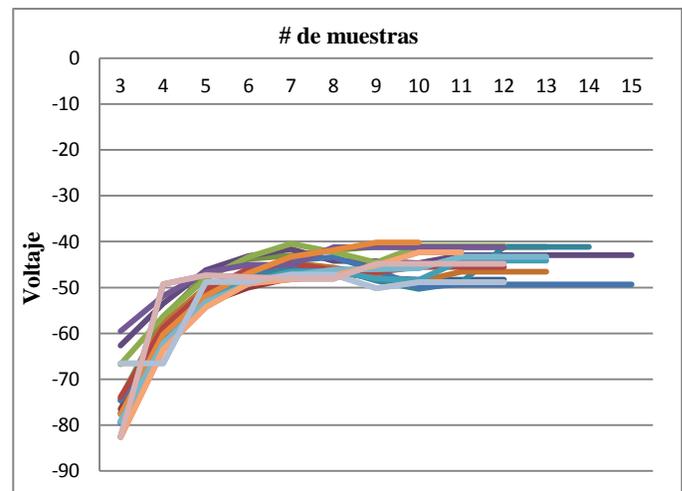


Fig. 15. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica en el sector en el que se realiza el apoyo plantar y medio sobre la baldosa.

#### Tercer sector de la característica de trabajo: elevación del talón y despegue del pie

La Fig. 16 muestra los resultados obtenidos para este sector de la característica de trabajo de la baldosa. Los resultados obtenidos muestran que en el despegue y elevación del pie de la baldosa, se produce un voltaje positivo que oscila entre 6,6 V y 9,85 V, con un promedio de 7,45 V. Luego del pico positivo de voltaje, la señal desciende hasta cero.

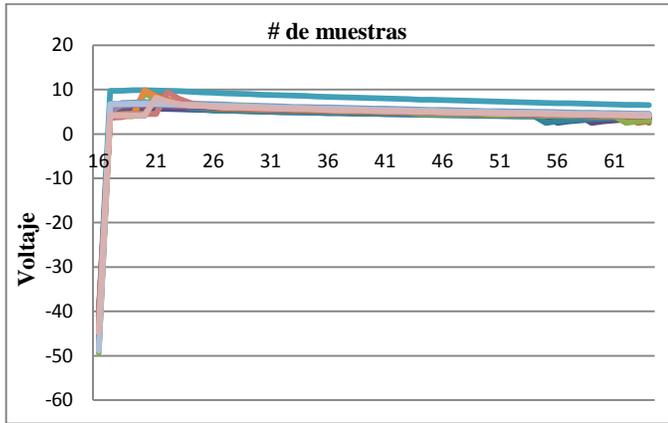


Fig. 16. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica en el sector en el que se produce la elevación del talón y despegue del pie.

Para determinar el tiempo en que el piezoeléctrico recupera su estado inicial, después del despegue del pie, se realizaron 10 pruebas, cuyos resultados se muestran en la tabla I. Se estableció que el tiempo de recuperación del piezoeléctrico es del orden de los 19,32 s.

TABLA I  
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DEL PIEZOELÉCTRICO

# Prueba	Tiempo (s)
1	19,05
2	17,66
3	18,27
4	18,56
5	18,26
6	18,96
7	23,23
8	20,89
9	18,52
10	19,88

Análisis de los resultados obtenidos al variar la metodológica de obtención de la característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica

Como modificación a la metodología de obtención de la característica de trabajo de la baldosa, se consideró una en la que el individuo realiza sobre la baldosa las tres etapas de un apoyo sencillo (contacto del talón, apoyo plantar y medio, y elevación y despegue del pie de la baldosa) con la diferencia de que, el apoyo plantar y medio se mantiene por un intervalo de tiempo mayor, antes del despegue del pie.

Los resultados obtenidos mostraron que el valor del voltaje negativo que aparece en el apoyo plantar y medio, descende sostenidamente a los largo del tiempo en que se mantiene el apoyo (ver Fig. 17). El tiempo máximo que puede mantenerse el apoyo plantar y medio sobre la baldosa es de 34 s, después de lo que el voltaje de salida es de 0 V.

Durante la elevación y despegue del pie, el valor del voltaje pico positivo aumenta, mientras mayor haya sido la duración del apoyo plantar y medio. Se obtuvieron valores positivos pico de hasta 60 V. El tiempo de recuperación del piezoeléctrico fue de 38,8 s.

En otro experimento, se observó la característica de salida de la baldosa como resultado de un salto sobre ella. Se registraron valores de 10 a 15 V en el impulso del salto, y, del orden de -100 a -110 V en la caída.

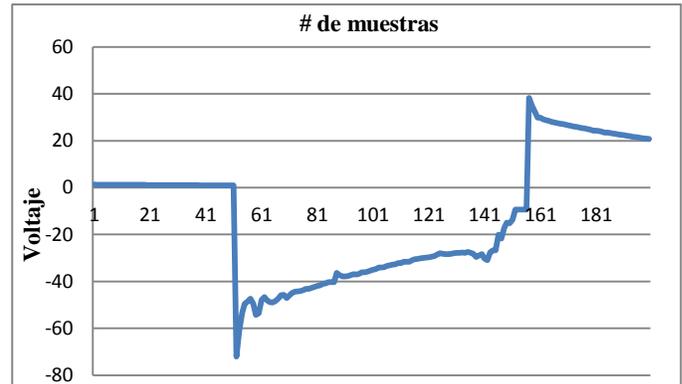


Fig. 17. Característica de trabajo de la baldosa piezoeléctrica obtenida para un apoyo plantar y medio sostenido.

IX. RELACIÓN DE LOS VALORES EN LA CARACTERÍSTICA DE TRABAJO DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA Y EL ESTEREOTIPO DEL SUJETO DE PRUEBA

A. Prueba de presión

Esta prueba se planteó para verificar si los parámetros de generación en el piezoeléctrico son independientes de la zona deformada en la baldosa. Para esto, la baldosa se zonificó en 5 áreas (ver Fig. 18).



Fig. 18. Zonificación de la baldosa piezoeléctrica para la prueba de presión

Se realizaron 5 pruebas para cada área. Se consideró un sujeto de prueba de 59 Kg de peso, utilizando calzado deportivo común.

En la tabla II, se resume los resultados de las pruebas efectuadas. Los resultados obtenidos muestran que los mayores voltajes se producen al presionar las áreas 4 y 5, ubicadas en el centro de la baldosa. En las áreas 1 y 3, ubicadas en los bordes de la baldosa, los voltajes generados son similares entre sí en el contacto con el talón, pero no así en el apoyo plantar y medio. En el área 2, no se distinguen las fases de contacto con el talón y de apoyo plantar,

observándose un solo voltaje de -39 V. El voltaje en el despegue del pie, es el mayor registrado en todas las áreas.

TABLA II  
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE PRESIÓN EN LA BALDOSA POWERLEAP

Área de la baldosa	Voltaje promedio de salida (V)		
	Contacto con el talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
1	-66,96	-53,18	6,33
2	-39,00	-39,00	7,98
3	-61,22	-25,37	4,08
4	-81,01	-45,00	6,80
5	-80,11	-43,32	6,60

### B. Prueba de la marcha humana

Para esta prueba se consideró el peso del sujeto de prueba. El tipo de calzado se restringió al uso de zapatos deportivos. La tabla III resume los resultados obtenidos, al aplicar el apoyo sencillo de un paso completo normal a la baldosa, en las áreas 4 y 5.

TABLA III  
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE MARCHA HUMANA SOBRE LA BALDOSA POWERLEAP

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	9,4
1,78	116	-163,21	-79,77	13,15

Los resultados obtenidos muestran que el voltaje generado es directamente proporcional al peso del sujeto de prueba.

Se determinó que el voltaje en el contacto del talón con la baldosa, depende sólo del peso, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio y en la elevación y despegue del pie, depende tanto del peso como de la velocidad del paso. Una mayor velocidad de paso, generó un mayor voltaje en el apoyo plantar y medio, y, un menor voltaje en la elevación y despegue del pie.

También se determinó que mientras mayor tiempo se permanezca sobre la baldosa, mayor será el voltaje en la elevación y despegue del pie, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio descenderá más rápido.

### C. Prueba de ubicación

Esta prueba se ideó para determinar la mejor ubicación posible para una baldosa piezoeléctrica. Para esto, se comparó los resultados obtenidos al ubicar una baldosa en el piso

(resultados anteriores), y, otra en el descanso de las escaleras (considerando la generación de energía tanto al subir como al bajar).

Las tablas IV y V, muestran los resultados obtenidos para una baldosa ubicada en el descanso de una escalera. Para la prueba se consideró las mismas variables que en la prueba de marcha humana.

El voltaje generado al ascender y descender por una escalera, es mayor al que se puede obtener a través de una pisada en una baldosa ubicada al nivel del piso. El voltaje generado en el contacto del talón con la baldosa, es mayor al descender por las escaleras.

TABLA IV  
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE UBICACIÓN DE LA BALDOSA POWERLEAP: DESCANSO DE ESCALERA AL SUBIR

Peso (Kg)	Voltaje promedio salida (V)		
	Contacto del talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
38	-47,84	-29,92	5,05
45	-59,72	-44,06	5,8
58	-82,27	-41,18	7,25
60	-84,18	-47,22	8,71
70	-107,32	-59,53	7,8
116	-149,83	-78,88	12,30

TABLA V  
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE UBICACIÓN DE LA BALDOSA POWERLEAP: DESCANSO DE ESCALERA AL BAJAR

Peso (Kg)	Voltaje promedio salida (V)		
	Contacto del talón	Apoyo plantar y medio	Elevación y despegue del pie
38	-53,33	-26,86	5,62
45	-69,76	-46,50	4,72
58	-96,54	-49,175	7,09
60	-91,93	-52,60	5,91
70	-102,47	-52,84	6,64
116	-153,62	-87,63	13,54

## X. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en el marco de este proyecto, podrán ser complementados con los generados por la prueba de carga de batería. Una vez conocido el voltaje promedio generado en una baldosa piezoeléctrica, se requiere aproximar el número de pasos requeridos para cargar totalmente una batería de ciclo profundo.

Completados los resultados, es pertinente plantear la implementación de proyectos aplicativos de las baldosas piezoeléctricas.

## XI. CONCLUSIONES

- El efecto piezoeléctrico se presenta en cristales cuya estructura no tiene centro de simetría. Para estos cristales el efecto piezoeléctrico puede actuar de dos formas: el efecto piezoeléctrico directo y el efecto piezoeléctrico inverso.

- El efecto piezoeléctrico directo se da en los cristales que son sometidos con una tensión mecánica dando como resultado una polarización eléctrica. El efecto piezoeléctrico inverso se da en los cristales que son sometidos a un campo eléctrico, dando como resultado la deformación del cristal.
- Los materiales piezoeléctricos se basan en la curva de la histéresis dieléctrica para su clasificación. Los materiales tipo hard presentan una curva de histéresis cerrada de área pequeña y se caracterizan por su alta potencia. Los materiales tipo soft presentan una curva de histéresis abierta con área mayor y se caracterizan por su alta sensibilidad.
- Las desventajas que presentan los materiales piezoeléctricos son el envejecimiento, la variabilidad de las propiedades piezoeléctricas en función de la temperatura y el límite de excitación eléctrico y mecánico.
- El funcionamiento de las baldosas piezoeléctricas se basan en el efecto piezoeléctrico directo.
- Para el harvesting de energía de la marcha en las baldosas piezoeléctricas es necesario tres etapas básicas que son el generador piezoeléctrico, el rectificador y el dispositivo de almacenamiento.
- La característica de trabajo de las baldosas piezoeléctricas PowerLeap se conforma por tres sectores. El primero muestra un pico de voltaje negativo, relacionado al momento en que el talón hace contacto con la baldosa. En el segundo, se realiza el apoyo plantar y medio sobre la baldosa, lo que genera un voltaje negativo menor, pero relativamente constante en un corto periodo de tiempo. En el tercero, se registra un pico de voltaje positivo correspondiente al momento de elevación del talón y despegue del pie.
- Con un sujeto de prueba de 58 Kg, el voltaje pico negativo cuando el talón hace contacto con la baldosa es en promedio de -71,08 V. En el apoyo plantar y medio, el voltaje negativo asciende rápidamente a un valor promedio de -46,26V, con una duración promedio de 0,55 s. En el despegue y elevación del pie de la baldosa, se produce un voltaje positivo promedio de 7,45 V; mientras que el tiempo de recuperación del piezoeléctrico es del orden de los 19,32 s.
- La prueba de presión sobre la baldosa piezoeléctrica permitió distinguir zonas en las que la generación es mayor. Los resultados mostraron que las zonas 4 y 5, ubicadas en el centro de la baldosa, generan mayores voltajes. En las áreas 1 y 3, ubicadas en los bordes de la baldosa, los voltajes generados son menores con respecto a las áreas 4 y 5, y, son similares entre sí en el contacto con el talón, pero no así en el apoyo plantar y medio. En el área 2, no se distinguen las fases de contacto con el talón y de apoyo plantar, observándose un solo voltaje negativo, siendo el menor con respecto a las demás áreas, mientras que el voltaje en el despegue del pie, es el mayor registrado en todas las áreas.
- Los resultados de la prueba de marcha humana mostraron que el voltaje generado es directamente proporcional al peso del sujeto de prueba. Se determinó que el voltaje en

el contacto del talón con la baldosa, depende sólo del peso, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio y en la elevación y despegue del pie, depende tanto del peso como de la velocidad del paso.

- Las pruebas de marcha humana también mostraron que una mayor velocidad de paso, genera un mayor voltaje en el apoyo plantar y medio, y, un menor voltaje en la elevación y despegue del pie.
- Las pruebas de marcha humana mostraron que mientras mayor tiempo se permanezca sobre la baldosa, mayor será el voltaje en la elevación y despegue del pie, mientras que el voltaje en el apoyo plantar y medio descenderá más rápido.
- La prueba de ubicación mostró que el voltaje generado al ascender y descender por una escalera, es mayor al que se puede obtener a través de una pisada en una baldosa ubicada al nivel del piso. El voltaje generado en el contacto del talón con la baldosa, es mayor al descender por las escaleras.

## XII. REFERENCIAS

- [1] Physical Basis, [Online]. Disponible en: <http://www.morgantechnicalceramics.com/download.php?type=document&document=126> [Consulta: Mayo 2012]
- [2] Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades, [Online]. Disponible en: [http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/RT-ATCP-01-\[ES\].pdf](http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/RT-ATCP-01-[ES].pdf) [Consulta: Mayo 2012]
- [3] ATCP do Brasil. Documento 3 de la fase 1. Materiales Piezoeléctricos, [Online]. Disponible en: <http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf> [Consulta: Junio 2012]
- [4] Piezoelectric Ceramics, [Online]. Disponible en: [http://www.polytecpi.com/PDF/Piezoelectric\\_Ceramics.pdf](http://www.polytecpi.com/PDF/Piezoelectric_Ceramics.pdf) [Consulta: Junio 2012]
- [5] Wei Ch., Ramasamy G. A Hybrid Energy Harvesting System for Small Battery Powered Applications. [Consulta: Agosto 2012]
- [6] The piezoelectric Effect, [Online]. Disponible en: <http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf> [Consulta: Agosto 2012]
- [7] POWERleap Product [Consulta: Agosto 2012]
- [8] Capítulo 3. Biomecánica de la marcha humana [Online]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_s\\_f/ca pitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_s_f/ca pitulo3.pdf) [Consulta: Agosto 2012]
- [9] Capítulo 2. Marcha normal, [Online]. Disponible en: [http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion/marcha\\_normal.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion/marcha_normal.pdf) [Consulta: Agosto 2012]
- [10] Tema 1: Calzado Deportivo, [Online]. Disponible en: <http://www.uclm.es/profesorado/xaguado/ASIGNATURAS/BTD/4-Apunte/Clase3%BA-01.pdf> [Consulta: Agosto 2012]
- [11] Estudio dinámico de la presión en el pie: podobarografía, [Online]. Disponible en: <http://www.sediabetes.org/resources/revista/00011075archivoarticulo.pdf> [Consulta: Agosto 2012]
- [12] Annie E. Edward S. Allwyn A. Performance Evaluation of Different Rectifiers for Piezo-electric Energy Harvesting Applications. [Consulta: Noviembre 2012]
- [13] Modelación y estudio de un microgenerador de energía con láminas piezoeléctricas. [Consulta: Noviembre 2012]
- [14] Ottman, G.K., Hoffman, H.F., Lesieutre, G.A. Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Step-down Converter in Discontinuous Conduction Mode. [Consulta: Noviembre 2012]
- [15] Sodano H., Park G, Inman D. An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications, [en línea]. Disponible en: <http://www.me.mtu.edu/~hsodano/Publications/MSSP%202003%20MFC%20Applications.pdf> [Consulta: Octubre 2012]