



**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**  
**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**  
**INGENIERO EN TELEINFORMÁTICA**

**ÁREA:**  
**TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

**TEMA:**  
**“ANÁLISIS FUNCIONAL Y ECONÓMICO DE UN**  
**GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE**  
**CELDAZ PIEZOELÉCTRICAS”**

**AUTOR:**  
**GUAMÁN PILLCO LUIS FERNANDO**

**DIRECTOR DEL TRABAJO**  
**ING. ELEC. ANDRADE GRECO PLINIO, MBA**

**GUAYAQUIL, JULIO 2020**



**ANEXO XI.- FICHA DE REGISTRO DE TRABAJO  
DE TITULACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CARRERA INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**



<b>REPOSITORIONACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>			
Análisis funcional y económico de un generador de energía eléctrica mediante celdas piezoelectricas.			
<b>AUTOR(ES)</b> (apellidos/nombres):		Guamán Pillco Luis Fernando	
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b> (apellidos/nombres):		Ing. Diana Gallegos / Ing. Plinio Andrade.	
<b>INSTITUCIÓN:</b>		Universidad de Guayaquil	
<b>UNIDAD/FACULTAD:</b>		Facultad Ingeniería Industrial	
<b>MAESTRÍA/ESPECIALIDAD:</b>			
<b>GRADO OBTENIDO:</b>		Ingeniero en Teleinformática	
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>		23 Octubre 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b> 83
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>		Tecnología Electrónica	
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>		Piezoeléctrico, Energía renovable, Sensores, Baldosas piezoelectricas, Energía eléctrica.	
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>El presente trabajo de investigación realiza un análisis funcional y económico de los sistemas generadores de energía eléctrica por medios renovables, específicamente mediante celdas piezoeléctricas. Este análisis contempla el diseño técnico de la implementación de sistemas piezoeléctricos y sus costos de instalación, presentando un análisis sobre el sistema más idóneo para implementarlo en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Guayaquil. Como parte de este estudio, se realizó un análisis comparativo de las implementaciones comerciales y experimentales que se han llevado a cabo en algunos países, lo que permitió obtener como resultado la cantidad y tipo de equipos, con sus respectivas características técnicas, necesarios para la instalación e implementación a futuro de estos sistemas en la Facultad, así como también la factibilidad económica para cada una de las plataformas de baldosas piezoeléctricas. En general se comprobó que esta tecnología no está lista por el momento para servir de opción para su uso en la Facultad.</p>			

This research work conducts a functional and economic analysis of the electrical power generator systems using renewable sources, specifically through piezoelectric cells. This analysis includes the engineering design of piezoelectric systems installation and costs, providing a study of the most suitable system in order to implement it at the Industrial Engineering Faculty of the 'University of Guayaquil'. As part of this investigation, a benchmarking of the commercial and experimental deployments that have been carried out in some countries was conducted, which led to obtain as a result the amount and type of equipment with their respective technical characteristics necessary for future installation and implementation of these systems within the Faculty, as well as the economic viability for each of the piezoelectric tile platforms. In general, it was found that this technology is not ready at the moment as an option to be used in the Faculty.

ADJUNTO PDF:	SI	X	NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0968216032		E-mail: Luis.guamanp@ug.edu.ec
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Ing. Ramón Maquilón Nicola		
	Teléfono: 593-2658128		
	E-mail: direccionTi@ug.edu.ec		



**ANEXO XII.- DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y DE  
AUTORIZACIÓN DE LICENCIA GRATUITA  
INTRANSFERIBLE Y NO EXCLUSIVA PARA EL USO NO  
COMERCIAL DE LA OBRA CON FINES NO ACADÉMICOS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CARRERA INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**

---

**LICENCIA GRATUITA INTRANSFERIBLE Y NO COMERCIAL DE LA OBRA  
CON FINES NO ACADÉMICOS**

Yo, **GUAMÁN PILLCO LUIS FERNANDO**, con C.C. No. **0706453388**, certifico que los contenidos desarrollados en este trabajo de titulación, cuyo título es “**ANÁLISIS FUNCIONAL Y ECONÓMICO DE UN GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE CELDAS PIEZOELÉCTRICAS**” son de mi absoluta propiedad y responsabilidad, en conformidad al Artículo 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, autorizo la utilización de una licencia gratuita intransferible, para el uso no comercial de la presente obra a favor de la Universidad de Guayaquil.

---

**GUAMÁN PILLCO LUIS FERNANDO**  
**C.C.No. 0706453388**



**ANEXO VII.- CERTIFICADO PORCENTAJE DE SIMILITUD**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**CARRERA INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**



Habiendo sido nombrado ING. ELEC. ANDRADE GRECO PLINIO, MBA, tutor del trabajo de titulación certifico que el presente trabajo de titulación ha sido elaborado por GUAMÁN PILLCO LUIS FERNANDO, C.C.: **0706453388**, con mi respectiva supervisión como requerimiento parcial para la obtención del título de INGENIERO EN TELEINFORMÁTICA.

Se informa que el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS FUNCIONAL Y ECONÓMICO DE UN GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE CELDAS PIEZOELÉCTRICAS”**, ha sido orientado durante todo el periodo de ejecución en el programa Antiplagio (URKUND) quedando el 4% de coincidencia.

**URKUND**

Documento: [Tesis-Luis Fernando Guaman Pillco.docx](#) (D80555278)

Presentado: 2020-10-02 13:04 (-05:00)

Presentado por: luis.guamanp@ug.edu.ec

Recibido: plinio.andrade@ug.edu.ec

Mensaje: TESIS-GUAMAN PILLCO [Mostrar el mensaje completo](#)

4% de estas 35 páginas, se componen de texto presente en 4 fuentes.

Categoría	Enlace/nombre de archivo	
	<a href="https://text-mx.123dok.com/document/wyer2k...">https://text-mx.123dok.com/document/wyer2k...</a>	<input checked="" type="checkbox"/>
	<a href="https://handbook.usfx.bo/nueva/vicerrectorad...">https://handbook.usfx.bo/nueva/vicerrectorad...</a>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Resumen tesis.docx	<input checked="" type="checkbox"/>
	1566795417_560__Smart_Tiles-1.docx	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Fuentes alternativas</b>		
<b>Fuentes no usadas</b>		

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

el Ecuador, la electricidad es importante para diversas actividades, sobre todo para negocios y empresas, como ha ocurrido en varias épocas donde los apagones o escases de energía eléctrica han generado diferentes dificultades y gastos elevados en cuento al problema de la energía eléctrica

**ING. ELEC. ANDRADE GRECO PLINIO, MBA**  
**C.C. 0907921051**  
**FECHA: 01 DE OCTUBRE DEL 2020**



**ANEXO VI. - CERTIFICADO DEL DOCENTE-TUTOR DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CARRERA INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**



Guayaquil, 01 de octubre del 2020.

Sr (a).

**Ing. Annabelle Lizarzaburu Mora, MG.**

Director (a) de Carrera Ingeniería en Teleinformática / Telemática

**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE  
GUAYAQUIL**

Ciudad. -

De mis consideraciones:

Envío a Ud. el Informe correspondiente a la tutoría realizada al Trabajo de Titulación **“ANÁLISIS FUNCIONAL Y ECONÓMICO DE UN GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE CELDAS PIEZOELÉCTRICAS”** del estudiante **GUAMÁN PILLCO LUIS FERNANDO**, indicando que ha cumplido con todos los parámetros establecidos en la normativa vigente:

- El trabajo es el resultado de una investigación.
- El estudiante demuestra conocimiento profesional integral.
- El trabajo presenta una propuesta en el área de conocimiento.
- El nivel de argumentación es coherente con el campo de conocimiento.

Adicionalmente, se adjunta el certificado de porcentaje de similitud y la valoración del trabajo de titulación con la respectiva calificación.

Dando por concluida esta tutoría de trabajo de titulación, **CERTIFICO**, para los fines pertinentes, que el estudiante está apto para continuar con el proceso de revisión final.

Atentamente,

**ING. ELEC. ANDRADE GRECO PLINIO, MBA.**

**C.C.: 0907921051**

**FECHA: 01 DE OCTUBRE DEL 2020**



**ANEXO VIII.- INFORME DEL DOCENTE REVISOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**CARRERA INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**



Guayaquil, 26 de octubre del 2020.

Sr (a).

**Ing. Annabelle Lizaraburu Mora, MG.**

Director (a) de Carrera Ingeniería en Teleinformática / Telemática

**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL**

Ciudad. -

De mis consideraciones:

Envío a Ud. el informe correspondiente a la REVISIÓN FINAL del Trabajo de Titulación **“ANÁLISIS FUNCIONAL Y ECONÓMICO DE UN GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE CELDAS PIEZOELECTRICAS”** del estudiante, **GUAMÁN PILLCO LUIS FERNANDO**. Las gestiones realizadas me permiten indicar que el trabajo fue revisado considerando todos los parámetros establecidos en las normativas vigentes, en el cumplimiento de los siguientes aspectos:

Cumplimiento de requisitos de forma:

El título tiene un máximo de 17 palabras.

La memoria escrita se ajusta a la estructura establecida.

El documento se ajusta a las normas de escritura científica seleccionadas por la Facultad.

La investigación es pertinente con la línea y sublíneas de investigación de la carrera.

Los soportes teóricos son de máximo 5 años.

La propuesta presentada es pertinente.

Cumplimiento con el Reglamento de Régimen Académico:

El trabajo es el resultado de una investigación.

El estudiante demuestra conocimiento profesional integral.

El trabajo presenta una propuesta en el área de conocimiento.

El nivel de argumentación es coherente con el campo de conocimiento.

Adicionalmente, se indica que fue revisado, el certificado de porcentaje de similitud, la valoración del tutor, así como de las páginas preliminares solicitadas, lo cual indica el que el trabajo de investigación cumple con los requisitos exigidos.

Una vez concluida esta revisión, considero que el estudiante está apto para continuar el proceso de titulación. Particular que comunicamos a usted para los fines pertinentes.

Atentamente,

**Ing. Diana Gallegos Zurita, Mg.**

**Docente Tutor Revisor**

**C.C. 1204926313**

### **Dedicatoria**

El presente proyecto de Titulación va dedicado a:

Mi madre Rosa Pillco quien con su amor y apoyo constante siempre estuvo en cada momento difícil y bueno, en todo mi trayecto de la carrera, que con sus consejos y su motivación de nunca darme por vencido y de luchar cada día por mis sueños.

A mi padre Luis Guamán quien con su apoyo y esfuerzo constante por verme seguir adelante siempre estuvo junto a mí a pesar de cada momento complicado de nuestras vidas.

A mis hermanos y familiares que son parte de este alcance de mi vida y que con su amor y apoyo incondicional estuvieron siempre alentándome seguir adelante.



### **Agradecimiento**

Después de culminada esta etapa de nuestras vidas, con el esfuerzo del día a día todo valió la pena y el cual es solo el comienzo para dar inicio a nuestro camino que viene por delante y sobre todo alcanzar sueños propuestos.

Me complace estar muy agradecido principalmente con Dios por darme la vida y por todo lo que he conseguido con ella.

A mis queridos padres que con su apoyo y su dedicación como padres ejemplares me formaron como una persona de bien que siempre luche por mis sueños, por eso estoy muy agradecido por ser mis principales fuentes de inspiración.

A la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Guayaquil por abrirme sus puertas y prepararme como un gran profesional.

A cada uno de los profesores y en especial a mi Tutor Ing. Plinio Andrade que a lo largo de todos los periodos estudiantiles me formaron con sus conocimientos y supieron ser unos buenos docentes.

A la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación por brindarme el apoyo económico mediante la Beca de Movilidad Territorial, para poder realizar mis estudios académicos.

## Índice General

N°	Descripción	Pág.
	Introducción	1

### Capítulo I

#### El problema

N°	Descripción	Pág.
1.1	Planteamiento del problema	2
1.1.1	Formulación del problema	3
1.1.2	Sistematización del problema	3
1.2	Objetivos del proyecto	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Justificación	4
1.4	Delimitación del Problema	5
1.5	Hipótesis de la investigación	5
1.6	Variables	5
1.6.1	Variables dependientes	5
1.6.2	Variables independientes	6

### Capítulo II

#### Marco referencial

N°	Descripción	Pág.
2.1	Antecedentes	7
2.2	Marco Teórico	9
2.2.1	Efecto Piezoeléctrico	9
2.2.1.1	Efecto Piezoeléctrico Directo	11
2.2.1.2	Efecto Piezoeléctrico Inverso	11

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
2.2.2	Materiales Piezoeléctricos	12
2.2.2.1	Materiales Naturales	13
2.2.2.2	Materiales Ferroeléctricos y Cerámicas	15
2.2.2.3	Material Grafeno	15
2.2.2.4	Piezoeléctricos artificiales	16
2.2.2.5	Zircanato Titanato de Plomo	19
2.2.3	Baldosa Piezoeléctrica	20
2.2.3.1	Modelos de Baldosas Piezoelectricas	20
2.2.4	Implementaciones recientes de generación de energía a nivel mundial por medio del efecto piezoeléctrico	22
2.3	Marco conceptual	27
2.3.1	La electricidad	27
2.3.2	Corriente eléctrica	28
2.3.2.1	Corriente continua	28
2.3.2.2	Corriente alterna	29
2.3.3	Potencia eléctrica	29
2.3.4	Sensor piezoeléctrico	29
2.3.5	Formulación matemática del efecto piezoeléctrico	30
2.3.6	Transducción Piezoeléctrica	31
2.3.7	Obtención de energía del cuerpo humano	32
2.3.7.1	El cuerpo humano como fuente de energía	32
2.3.7.2	La actividad física del caminar	32
2.3.8	Sistema Piezoeléctrico	33
2.3.9	Regulador de tensión	35
2.3.10	Batería o acumulador de energía generada	35
2.3.11	Inversor o conversor CC/CA	36
2.4	Marco Legal	36

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
2.4.1	Constitución de la república del Ecuador 2008	36
2.4.2	Ley orgánica del servicio de energía eléctrica (LOSPEE)	37

### **Capítulo III**

#### **Metodología y propuesta de la investigación**

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
3.1	Definición de la propuesta	38
3.2	Planificación del proyecto	38
3.3	Prueba de tensión realizadas al piezoeléctrico (PZT)	38
3.4	Unidad y configuración de piezoeléctricos	40
3.5	Pruebas realizadas a un piso generador con celdas piezoelectricas	40
3.5.1	Prueba de tensión realizadas a un piso generador con celdas piezoelectricas	41
3.5.2	Prueba de corriente realizada a un piso generador con celdas piezoelectricas	41
3.6	Espacio determinado para el estudio de implementación del sistema piezoeléctrico	42
3.6.1	Estimación de desplazamiento de los alumnos y el tiempo en el pasillo	43
3.7	Características técnicas y costo de material piezoeléctrico	43
3.8	Calculo y análisis de generación de energía del sistema piezoeléctrico	45
3.8.1	Análisis de viabilidad de la energía generada para el consumo del sistema de iluminación	47
3.8.2	Estimación de costo del sistema piezoeléctrico con materiales piezoeléctricos	48
3.9	Análisis de energía eléctrica mediante baldosas piezoelectricas	48
3.9.1	Especificaciones y características técnicas de los dispositivos piezoeléctricos	49

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
3.10	Análisis de la tecnología de energía eléctrica mediante baldosas piezoelectricas disponibles en el mercado	51
3.10.1	Análisis de la capacidad de Generación	51
3.10.2	Estimación de costo del sistema piezoeléctrico con baldosas Power Floor	54
3.11	Diagrama de conexiones de un Sistema Piezoeléctrico	55
3.12	Conclusiones	56
3.13	Recomendaciones	56
	<b>Anexos</b>	58
	<b>Bibliografía</b>	63

## Índice de tablas

N°	Descripción	Pág.
1	Materiales piezoeléctricos más comunes según su naturaleza	13
2	Características de los materiales usados como piezoeléctrico	17
3	Implementación piezoeléctrica a nivel mundial	22
4	Múltiplos y Submúltiplos de la potencia eléctrica	29
5	Calculo de la fuerza respecto a la masa	39
6	Tensiones resultantes	40
7	Tensiones resultantes piso generador	41
8	Costos de Materiales piezoeléctricos	44
9	Costo del sistema piezoeléctrico con materiales piezoeléctricos	48
10	Especificaciones técnicas y costos de los dispositivos piezoeléctricos.	49
11	Características de las baldosas piezoelectricas Power Floor	51
12	Costos de mantenimiento baldosas piezoeléctricas Power Floor	51
13	Costos de implementación baldosas piezoeléctricas Power Floor	52
14	Costo del sistema piezoeléctrico con Baldosas Power Floor	54

## Índice de figuras

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
1	Efecto Piezoeléctrico directo e inverso	10
2	Efecto Piezoeléctrico estructura molecular	11
3	Presentación de una estructura laminada constituida por material piezoeléctrico	11
4	Efecto piezoeléctrico	12
5	Materiales Naturales	14
6	Polarización neta de un material cerámico (piezoeléctrico artificial)	17
7	Baldosa Powerfloor - POWERLeap	21
8	Baldosas Pavegen	22
9	Electrones y átomos	28
10	Tipos de corriente	28
11	Sensor piezoeléctrico	30
12	Cargas eléctricas	30
13	Recuperación de la energía que consume el cuerpo humano	33
14	Esquema estructural del Sistema de Generación Piezoeléctrica	34
15	Proceso de transformación de energía, efecto piezoeléctrico	34
16	Colocación de celdas piezoelectricas y espuma de hule	41
17	Prueba de corriente	42
18	Plano del espacio de implementación	42
19	Plano 3D del espacio de implementación	43
20	Principio de operación del capacitor	47
21	Diagrama Sistema Piezoeléctrico	55

**Índice de anexos**

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
1	Artículos Investigativos	59
2	Diagrama de Sistema Piezoeléctrico	61
3	Diagrama sistemático de baldosa	62





**ANEXO XIII.- RESUMEN DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN (ESPAÑOL)  
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CARRERA INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**



---

---

**“ANÁLISIS FUNCIONAL Y ECONÓMICO DE UN GENERADOR DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA MEDIANTE CELDAS PIEZOELÉCTRICAS”**

**Autor:** Guamán Pillco Luis Fernando

**Tutor:** Ing. Elec. Andrade Greco Plinio

**Resumen**

El presente trabajo de investigación realiza un análisis funcional y económico de los sistemas generadores de energía eléctrica por medios renovables, específicamente mediante celdas piezoeléctricas. Este análisis contempla el diseño técnico de la implementación de sistemas piezoeléctricos y sus costos de instalación, presentando un análisis sobre el sistema más idóneo para implementarlo en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Guayaquil. Como parte de este estudio, se realizó un análisis comparativo de las implementaciones comerciales y experimentales que se han llevado a cabo en algunos países, lo que permitió obtener como resultado la cantidad y tipo de equipos, con sus respectivas características técnicas, necesarios para la instalación e implementación a futuro de estos sistemas en la Facultad, así como también la factibilidad económica para cada una de las plataformas de baldosas piezoeléctricas. En general se comprobó que esta tecnología no está lista por el momento para servir de opción para su uso en la Facultad.

**Palabras Claves:** Piezoeléctrico, Energía renovable, Sensores, Baldosas piezoelectricas, Energía eléctrica.



**ANEXO XIV.- RESUMEN DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN (INGLÉS)  
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CARRERA INGENIERÍA EN TELEINFORMÁTICA**

---



**‘FUNCTIONAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF AN ELECTRICAL POWER  
GENERATOR THROUGH PIEZOELECTRIC CELLS’**

**Author:** Guamán Pillco Luis Fernando

**Advisor:** Ing. Elec. Andrade Greco Plinio

**Abstract**

This research work conducts a functional and economic analysis of the electrical power generator systems using renewable sources, specifically through piezoelectric cells. This analysis includes the engineering design of piezoelectric systems installation and costs, providing a study of the most suitable system in order to implement it at the Industrial Engineering Faculty of the ‘University of Guayaquil’. As part of this investigation, a benchmarking of the commercial and experimental deployments that have been carried out in some countries was conducted, which led to obtain as a result the amount and type of equipment with their respective technical characteristics necessary for future installation and implementation of these systems within the Faculty, as well as the economic viability for each of the piezoelectric tile platforms. In general, it was found that this technology is not ready at the moment as an option to be used in the Faculty.

**Keywords:** Piezoelectric, Renewable energy, Sensors, Piezoelectric tiles, Electric power.

## **Introducción**

La producción y el uso de energía no renovable es una de las principales causas de la emanación de gases de efecto invernadero, la cual es una de las principales causas del calentamiento global, estos gases a su vez son provenientes principalmente de combustibles fósiles que con el pasar de los años son más escasos y de mayor precio. Debido a esto y a otros factores, en los últimos años el uso de energías renovables ha ido en aumento, tratando de algún modo contrarrestar el uso de energía proveniente de combustibles fósiles, centrales hidroeléctricas o termoeléctricas.

El presente trabajo detalla el estudio funcional y económico para la utilización de sistemas piezoeléctricos dentro de un determinado lugar, en la investigación será tomada en cuenta el área de pasillo de la carrera de Ingeniería en Teleinformática, si es viable o no la transición de la obtención de energía eléctrica a través de celdas piezoeléctricas. Específicamente se centra en el campo de los materiales piezoeléctricos cuando se usan como generadores de energía eléctrica, el problema surge entonces de la pregunta ¿Cómo aprovechar la energía mecánica que ejerce el ser humano en el suelo al caminar? La respuesta se puede encontrar con el uso de los materiales piezoeléctricos.

En el capítulo I nombrado El problema se detalla la sistematización del problema a estudiar, los objetivos que se requieren alcanzar al finalizar el trabajo de titulación, la justificación del mismo del desarrollo de la investigación.

El marco teórico como se titula el capítulo II se presentan los antecedentes de la investigación, la utilización de sistemas piezoeléctricos aplicados en algunos países y el impacto ambiental en cada uno y el marco legal que avalen el presente trabajo.

El capítulo III titulado Metodología y propuesta; es donde se detallan los métodos y las técnicas utilizadas para el trabajo de titulación y el cual permite elegir el método de transición al uso de sistemas piezoeléctricos. También se realiza el estudio de factibilidad técnica y económica para la utilización del sistema piezoeléctrico que más convenga para implementar y comprobar su viabilidad.

## **Capítulo I**

### **EL Problema**

#### **1.1 Planteamiento del Problema**

Los seres humanos necesitan electricidad para cubrir sus necesidades, las fuentes de energía más utilizadas son la del sol, el viento y el agua. Proviene de dos fuentes principales de energía: energía renovable y energía no renovables. La energía utilizada habitualmente o también llamada la no renovable, es la energía que se produce a partir de fuentes que se agotan con mayor facilidad. Los tipos de energía no renovables son los combustibles fósiles; carbón, gas natural y petróleo. La energía nuclear que es la fisión y fusión nuclear. Estas una vez que se agotan se puede renovar, pero toman un tiempo en hacerlo y al momento que se desea volver extraer estos productos se destruye el medio ambiente. Por otro lado, está la energía renovable son aquellas que no se agotan, como es el sol, la energía eólica, mareomotriz y geotérmica, etc.

Desde 1752 Benjamín Franklin quien dio apertura para el descubrimiento de la electricidad ha sido de gran ayuda para los múltiples beneficios de la humanidad, la cual en la actualidad utiliza altos niveles de consumo de energía eléctrica para las diferentes labores diarios como ejemplo en instituciones educativas, empresa, en el hogar y espacios públicos etc.

Por otra parte, en el Ecuador, la electricidad es importante para diversas actividades, sobre todo para el hogar, negocios y empresas, como ha ocurrido en varias épocas donde los apagones o escases de energía eléctrica han generado diferentes dificultades y gastos elevados en cuanto al problema de la energía eléctrica proporcionada por la empresa eléctrica.

Por ello en múltiples ocasiones se han presentado investigaciones que busquen dar solución a estas dificultades de electricidad, y reducir los escases de energía, pero generar gastos elevados y también conllevan repercusiones ambientales como en las empresas hidroeléctricas que para su implementación necesitan cubrir áreas fértiles que favorecen en gran parte a la economía del país.

Por estas razones se plantea la idea de generación de energía eléctrica a través de sistemas piezoeléctricos haciendo uso de la energía proporcionada por el ser humano al generar pisadas, con el fin de reducir el impacto de consumo energía eléctrica en la institución pública, y ser un centro de generación de distribución de energía eléctrica.

### **1.1.1 Formulación del problema.**

¿Qué características técnicas se deben de tomar en cuenta para que un generador de energía mediante celdas piezoelectricas genera energía necesaria para alimentar un circuito básico?

### **1.1.2 Sistematización del problema.**

La elaboración del presente análisis de investigación es de interés para el escritor, por que posibilitará la puesta en práctica en el análisis funcional de un generador de energía eléctrica mediante celdas piezoeléctricas que pueda solventar las necesidades del ser humano mediante la creación de una nueva energía eléctrica limpia y renovable.

Lo que conlleva a que la redacción de este trabajo de titulación permita facilitar la obtención de respuestas a las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo se realizará la obtención de energía eléctrica mediante celdas piezoeléctricas?
- ¿Cómo se demostrará el análisis funcional de generadores piezoeléctricos?
- ¿Cómo se demostrará el análisis económico del generador de energía eléctrica por celdas piezoelectricas?

## **1.2 Objetivos del proyecto**

### **1.2.1 Objetivo general.**

Demostrar la viabilidad de implementación de un sistema de generación de energía piezoeléctrica para la facultad de Ingeniería Industrial mediante un análisis técnico y económico.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Evaluar proyectos relevantes implementados en diversos países con sistemas piezoeléctricos.
- Definir cuál de los tipos de materiales piezoeléctricos existentes es viable para la generación de energía eléctrica.
- Realizar un análisis técnico de un circuito de implementación.
- Estimar mediante cálculos la capacidad de energía eléctrica obtenida y el costo de implementación de generadores con sistemas piezoeléctricos.

### 1.3 Justificación

En la actualidad, las formas de generar de energía eléctrica se han vuelto perjudiciales para el entorno medio ambiental, por un lado, esta no es la razón principal, si existen razones suficientes para considerar si es posible desarrollar métodos alternativos de generación de energía que puedan satisfacer las necesidades necesarias y no dañen el medio ambiente.

La implementación de nuevas fuentes de generación con un factor menos contaminante ha brindado lo que hoy llamamos energía limpia es la energía eléctrica producida por fuerzas naturales y los sistemas adecuados para su captación y conversión.

El hombre se encuentra en un estado social y muchas veces se traslada de un lugar a otro por diversas razones para realizar este trabajo. Utiliza su habilidad motriz, en esta propuesta de investigación se demostrará el aprovechamiento de la energía mecánica que el hombre produzca al caminar, considerando la presión que ejerce en la superficie en movimiento.

La presión mecánica generada por el cuerpo humano y la celda piezoeléctrica que soporta la presión son presionadas debajo de su superficie (considerando las características del material piezoeléctrico utilizado para generar energía eléctrica bajo tensión mecánica), se analizara el funcionamiento de generar energía mediante celdas piezoelectricas.

El impacto social de la presente investigación propone el uso de la tecnología piezoelectricidad y buscar alternativas para nuevas fuentes de energía, fuentes que ayuden a compensar los problemas que actualmente nuestro planeta enfrenta, por ejemplo, como la perdida de la biodiversidad, el consumo exagerado de hidrocarburos y alto nivel de uso de la energía eléctrica.

La razón social está dada porque el uso de la energía renovable e innovadora para los negocios los cuales actualmente usan plantas de energía, cuando surgen problemas eléctricos como son en los apagones o son ejecutadas en momentos de emergencia, pero cabe mencionar el alto costo y la utilización de otro elemento como es el combustible que ocasiona contaminación para el medio ambiente el uso de este tipo de energía, hace que la implementación de un generador de energía eléctrica por celdas piezoelectricas, sea eficiente y eficaz para su ejecución.

En el ámbito técnico se debe considerar un sistema Piezoeléctrico conveniente para su uso, el cual se indicará en el desarrollo de esta investigación dando todos los requerimientos necesarios para su aplicación, especificando los equipos y cantidad necesarios, el coste por el tipo de celdas piezoelectricas que más beneficie. Así mismo dar a conocer los reglamentos o leyes que avalen el desarrollo del trabajo.

En cuanto al factor ambiental esta investigación busca beneficiar al ecosistema en la reducción de la contaminación ambiental, mediante el uso de la energía renovable proporcionada por la energía mecánica del ser humano. Por esta razón el estado ecuatoriano ha proporcionado a través del plan Nacional del Buen vivir un enfoque en el mejoramiento del medio ambiente a través del control del consumo de energía eléctrica haciendo uso de sistemas no convencionales para la generación de energía eléctrica.

#### **1.4 Delimitación del Problema**

Esta investigación se basa en el análisis funcional y económico de generador de energía eléctrica mediante celdas piezoeléctricas que ayude a una implementación futura para la obtención de energía eléctrica renovable. Como medio geográfico de posible implementación se tomará uno de los pasillos del área de la carrera de Ingeniería Teleinformática de la facultad de Ingeniería Industrial que se estima un espacio de 10 m<sup>2</sup>.

Logrando los siguientes aspectos a considerar en el estudio realizado:

- Comparar los tipos de sistemas utilizados en algunos países ya implementados.
- Evaluar el costo de los sensores o celdas piezoelectricas para los generadores.
- Proponer un estudio económico en pro de identificar los gastos y costos del proyecto, para su futura implementación en algún lugar muy transitado.

#### **1.5 Hipótesis de la investigación**

El análisis técnico del uso de un sistema de generación de energía piezoeléctrica en conjunto con el análisis económico del mismo no será viable en la forma de obtener energía eléctrica haciendo uso de los sistemas piezoeléctricos en el pasillo de la facultad determinado como prueba de estudio.

#### **1.6 Variables**

##### **1.6.1 Variables dependientes**

- Desconocimiento de la utilidad de las energías renovables.
- Poca demanda de peatones durante el tiempo de recolección de energía.
- Poco tiempo de utilización de las baldosas durante el día.
- Baja generación de energía eléctrica de las baldosas.

### **1.6.2 Variables independientes**

La energía piezoeléctrica como energía renovable se encuentra en vías de desarrollo y en una etapa de innovación.



## **Capítulo II**

### **Marco Teórico**

#### **2.1 Antecedentes**

En los últimos años se han presentado nuevas ideas, que permiten potencializar el ahorro del consumo de la energía y con la implementación de transformar energías renovables en energía eléctrica en donde podemos tener como ejemplos las siguientes energías renovables que ya están en marcha: la energía eólica, mareomotriz, térmica y la muy famosa energía solar o fotovoltaica.

Aunque la piezoelectricidad es conocida desde el siglo XIX y se han realizado aplicaciones en el campo militar y aeronáutico, fue poca la utilización de este efecto para la producción de energía, por lo que es una de las energías alternativas menos desarrollada. Sin embargo, a partir del cambio climático y sus consecuencias, se incentivó a nivel mundial el uso de nuevas tecnologías a través de la implementación del protocolo de Kioto (1997), lo que originó un nuevo interés en esta tecnología.

En el año 2001 Nathan Shenck y Josep Paradiso del laboratorio de medios de MIT (Massachusetts Institute of Technology), del grupo de ambiente receptivos, crearon un dispositivo discreto capaz de generar electricidad de la fuerza ejercida en un zapato cuando el usuario camina, siendo este uno de los primeros dispositivos que se crearon para generar energía eléctrica a partir del movimiento peatonal y la fuerza ejercida por las pisadas usando el efecto piezoeléctrico.

Conociendo los alcances del efecto piezoeléctrico para la generación de energía, en el año 2008 en Japón, la compañía encargada del metro (East Japan Railway) decidió aprovechar el flujo masivo de personas que hacen uso del metro para beneficio propio con la instalación de zonas de paso creadas con materiales piezoeléctricos ubicados en los tornos de entrada, como resultado obtuvieron la generación de 10 W/seg con el sistema funcionando al 90% de su capacidad energía que es usada para los torniquetes y carteles electrónicos (Borja, 2008). Estos últimos avances y aplicaciones de estos materiales, en 2009 llevaron a Innowatech, una empresa de ingeniería israelí a ser pioneros en desarrollar una técnica por medio de piezoelectricidad para generar energía a partir del peso, movimiento y vibraciones de los vehículos, instalando generadores 0,05 m bajo el asfalto de algunas autopistas concurridas, permitiendo así abastecer de electricidad los alumbrados públicos en las zonas aledañas (Tamayo & Cardozo, 2017).

En cuanto a baldosas piezoelectricas, los más reconocidos son la empresa PAVEGEN, fundada en el año 2009 por Laurence Kemball-Cook, y que cuenta con avanzada tecnología que les permite a sus baldosas obtener por pisada entre 4-8 W que puede ser usada directamente o almacenada para su posterior uso, permitiéndole implementar estas en aeropuertos, maratones, estadios, colegios, discotecas, entre muchos otros (Fresneda, 2013).

Respecto al desarrollo de esta tecnología a nivel nacional, en el año 2013 en la ciudad de Medellin se desarrolló un proyecto con el fin de generar energía a través de las vías de la ciudad en el sector del Poblado gracias a la compañía Trevoolt (Tamayo & Cardozo, 2017). Por otro lado, también en el mismo año la Corporación Universitaria Minuto de Dios desarrollo la evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico para generación de energía gracias a la iniciativa planteada por famoso ingeniero, el Dr Jorge Reynolds Pombo desarrollando así el programa de tecnología electrónica para la investigación exploratoria (Catellano, 2013).

Investigadores del área de ingeniería mecánica de varias universidades, entre las que se encuentran la universidad de Florida, la universidad técnica de Estambul, la universidad de Selcuk y la universidad de Marmara, en el año 2010 realizaron un trabajo que buscaba diseñar y probar un recolector de energía eficiente y compacto usando materiales piezoeléctricos (Korla, Leon, Tansel, & Yenilmez, 2011).

En el trabajo los investigadores construyeron recolectores de energía compactas con un tamaño equivalente de una batería AA. Cada uno de los recolectores conto con un circuito de 4 diodos y un capacitor. Una serie de recolectores piezoeléctricos con secciones circulares fueron construidos y probados a diferentes frecuencias y amplitudes.

Una vez que fueron construidos los recolectores, se observó su comportamiento en un osciloscopio digital, y se pudo determinar que los voltajes llegaban de 3 a 6 v en las secciones instaladas. Donde la potencia más alta que se logro fue de 525 uW ( (Korla, Leon, Tansel, & Yenilmez, 2011).

Entre otras conclusiones, se detectó que la salida del recolector es de bajas amplitudes. Sin embargo, a medida que la amplitud aumentada, se observaba que la sección brindaría una mejor interacción que no sobrepasaba en gran escala, lo que concluyeron que esta energía tendría menos posibilidades de crecer hasta que tenga un buen sistema de almacenamiento de energía.

En Estados Unidos de Norteamérica durante el año 2008 se realizó otro estudio relacionado al tema planteado del proyecto. Esta vez se produjeron 4 prototipos de prueba que fueron construidos con materiales piezoeléctricos. La idea era que tuvieron la forma

para poder introducirlos dentro de una bota, haciendo que cuando la persona usa los zapatos camine, genere energía eléctrica por medio de su propia energía mecánica. Luego de terminar con el estudio, se concluyó que para una persona promedio de 68kg, el dispositivo podía generar mucha menos potencia de la meta que plantearon al principio de 0.5W. (Howells, 2009).

La idea es utilizar tecnología que ya se encuentra en uso en países como Italia e Israel. Se desean poner sensores piezoeléctricos relativamente baratos por debajo de carreteras, los cuales puedan generar a partir de las vibraciones producidas por los vehículos cuando transitan sobre estas.

Donde su objetivo era alimentar las luces de las carreteras, cabinas telefónicas y hasta las comunidades vecinas. Donde se obtuvo como reporte en el 2009, cuando la tecnología fue instalada en las calles de Israel, el gobierno de ese país asegura que se encontraban en capacidad de generar 2000 W-h de electricidad, únicamente por el hecho de implementar en un sistema a lo largo de 10 metros de autopista, con lo cual no se obtuvo esa cantidad propuesta sino una menos rentable de 500 Watt-hora/día (Gatto, 2011).

Finalmente, para el año 2017, como trabajo de grado en ing. civil de la Universidad Católica, se desarrolló un perfil vial en el cual se implementaba el uso de piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica (Tamayo & Cardozo, 2017). Así mismo, en la Universidad Javeriana, como parte de un trabajo de grado, se propone un recolector de energía piezoeléctrico para una zona de alto tráfico vehicular en la ciudad de Cali, basados en el recolector de energía creado en el año 2014 en la universidad nacional (Quintero & Fernández, 2017).

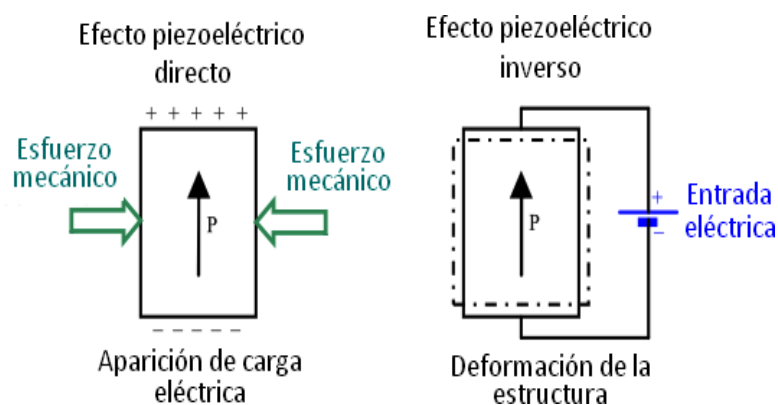
## **2.2 Marco Teórico**

### **2.2.1 Efecto Piezoeléctrico.**

Según (Gomez, 2017), el efecto piezoeléctrico fue descubierto primeramente por Pierre y Jacques Curie en 1880, también, al final de la primera guerra mundial fue descubierto las ondas sonoras que son producidos por los submarinos que eran detectados por el cuarzo, este material el cual fue estudiado por los hermanos Curie donde al sumergirlo en el agua, donde actuaba de transductor que hacia resonar a 50 MHz, logrando poder medir la profundidad y que tiempo del eco tenía su retorno, así se evidencio que los materiales piezoeléctricos podían ser utilizados como un mecanismo para transformar las vibraciones

ambientales en energía eléctrica, la cual se podía ser almacenada mediante algún sistema de almacenamiento.

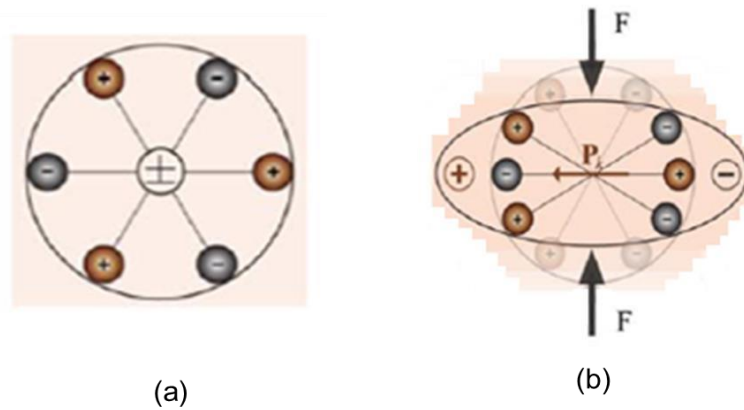
El efecto piezoeléctrico es el fenómeno físico que se presenta en algunos cristales al someterlos a una fuerza, polarizando eléctricamente su masa, apareciendo una diferencia de potencial eléctrico (tensión) y una carga eléctrica en sus superficies, igualmente se conoce como piezoelectricidad, palabra que proviene del griego *piezein*, que significa “estrujar o apretar” (Sodano, 2015). Se manifiesta en un elemento piezoeléctrico como; efecto piezoeléctrico directo y efecto piezoeléctrico inverso, figura 1.



**Figura 1.** Efecto Piezoeléctrico directo e inverso, 2020. Información tomada directa. Elaborado por el autor.

En esencia, la piezoelectricidad es una relación entre la mecánica del material y su comportamiento eléctrico; el potencial del material de convertir la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Aplicando una fuerza a un material piezoeléctrico, se produce un momentáneo reagrupamiento de las moléculas, causando una tensión temporal entre ciertos lados del material.

En la figura 2, se muestra el efecto piezoeléctrico en una estructura molecular simple. En la parte (a); se observa una molécula donde los centros de carga positiva y negativa, coinciden generando una molécula eléctricamente neutra. En la parte (b); la presencia de una fuerza mecánica externa, provoca polos opuestos enfrentados al interior del material. Cargas fijas aparecen en la superficie debidas a un desplazamiento de las cargas propias del material.



**Figura 2.** Efecto Piezoeléctrico estructura molecular, 2020. Información tomada directa. Elaborado por el autor.

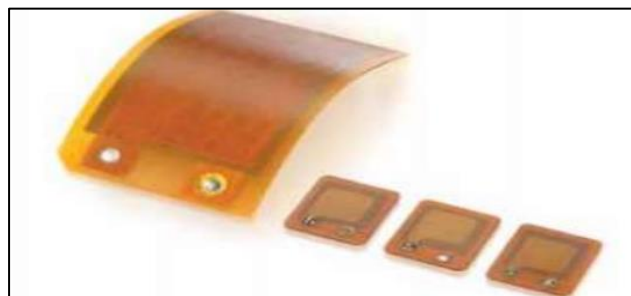
### 2.2.1.1 Efecto Piezoeléctrico Directo.

El efecto piezoeléctrico directo, se exhibe cuando una fuerza o vibración mecánica en el piezoeléctrico genera una carga o tensión eléctrica entre sus terminales (CENIDET, 2015). En este caso el material piezoeléctrico actúa como sensor y la polaridad del material depende del tipo de esfuerzo.

### 2.2.1.2 Efecto Piezoeléctrico Inverso.

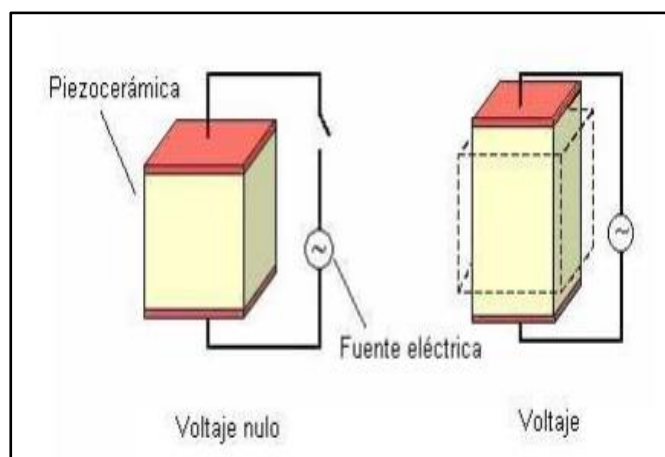
El efecto piezoeléctrico inverso; aparece cuando aplicando un campo eléctrico o tensión eléctrica al piezoeléctrico, se produce un cambio dimensional o deformación. En este caso el material piezoeléctrico tiene un comportamiento de un conductor y la dirección del campo depende de la dirección de polarización (CENIDET, 2015).

Este material para ser utilizado como fuente de dispositivos eléctricos, se presenta como actuador piezoeléctrico, el cual al ser manejado en su forma inversa muestra las siguientes ventajas: la generación de grandes fuerzas, expansión rápida, no presentan efecto magnético y está libre de desgaste y roturas. A su vez, este se puede exhibir en forma de estructura laminar como se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Presentación de una estructura laminada constituida por material piezoeléctrico, 2020. Información tomada de Piezoelectric Actuators. Elaborado por el autor.

Según (ICONO, 2010), la piezoelectricidad o efecto piezoeléctrico es la característica de ciertos materiales que al observar sus celdas unitarias no tienen una simetría por sus centros eléctricos donde al presentar un ion positivo(+) lejos del centro de las cargas negativas(-) se presenta y aparece un momento dipolar. Teniendo en cuenta que según la presión que se le brinde al material sus cargas de polarización tomaran la dirección de sus cargas eléctricas por la deformación. A continuación, en la figura 4 se muestra esquemáticamente el efecto piezoeléctrico.



**Figura 4.** Efecto piezoeléctrico, 2020. Información tomada de <https://icono.fecyt.es>. Elaborado por el autor.

### 2.2.2 Materiales Piezoeléctricos.

Según (Gomez, 2017) los materiales piezoeléctricos de interés para aplicaciones tecnológicas son sólidos cristalinos. Estos pueden ser monocristales (naturales o sintéticos) o materiales policristalinos como las cerámicas ferroeléctricas, que polarizándolas se pueden volver piezoeléctricas y tener a escala macroscópica simetría monocristalina al formarse dos polos. La ciencia de la cristalografía proporciona una nomenclatura altamente desarrollada y una gran cantidad de datos útiles para los ingenieros y científicos que trabajan con cristales piezoeléctricos.

El termino cristal se aplica a un sólido en que los átomos están dispuestos en un único patrón repetido en todo el cuerpo. En cada cristal, los átomos están agrupados en pequeños grupos, todos ellos iguales, orientados de igual manera y alienados en las tres dimensiones. Cada grupo se puede considerar delimitado por un paralelepípedo. El cristal se forma juntando en las tres dimensiones estos paralelepípedos sin espacio entre ellos. A esto se le llama celda unitaria. La celda unitaria puede tener diferentes formas y dimensiones dependiendo de los átomos que la formen. La celda unitaria tiene el menor tamaño posible.

Dentro de los 32 grupos cristalográficos existen 21 que no tienen un centro de simetría, y de estos unos 20 exhiben directamente la piezoelectricidad, 10 de estos son polares; es decir presentan polarización instantánea debido a que contienen un dipolo eléctrico (dos cargas iguales y opuestas, separadas por una distancia) en su celda unidad, exhibiendo piroelectricidad ( cuando se someten a una variación de temperatura, ejemplo: la turmalina, el topacio, etc.), de entre estos algunos son ferro-eléctricos; cuando puede invertirse la dirección del dipolo mediante la aplicación de un campo eléctrico, igualmente se distinguen turmalina y los llamados ferro-eléctricos, que presentan propiedades piezoelectricas tras ser sometidos a una polarización; tantalio de litio, nitrato de litio, berlinita, en forma de materiales monocristalinos y cerámicas o polímeros polares bajo forma de microcristales orientados (Hernandez, 2016). A continuación se muestra una tabla con materiales más comunes según su naturaleza.

**Tabla1.** Materiales piezoeléctricos más comunes según su naturaleza.

Naturales	Sintéticos
Cuarzo	PZT (titaniato de plomo con zinconato)
Sal de Rochelle	PVDF (Polímero de fluoruro de polivinilideno)
Turmalina	Titanato de bario
Topacio	Óxido de Zinc
Sacarosa	

*Información tomada de materiales piezoelectricos.com, 2020. Elaborado por el autor.*

#### **2.2.2.1 Materiales Naturales.**

Según (Molina, 2018) los materiales que poseen propiedades piezoeléctricas de manera natural, se encuentran en forma de minerales o cristales obtenidos de la naturaleza. Entre sus características destacan que sus propiedades casi no varían con el paso de tiempo, pero el mayor problema es que las señales eléctricas que producen son pequeñas. En este caso los materiales como el cuarzo, la turmalina y la sal rochelle presenta la energía de la piezoelectricidad en su composición.



**Figura 5.** *Materiales Naturales, 2020. Información tomada de Ciencia Tecnología y Ambiente. Elaborado por el autor.*

### **Cuarzo**

La estructura cristal gráfica del cuarzo permite obtener, mediante cortes, laminas con propiedades piezoelectricas. Estas laminas (cristales), con sus correspondientes electrodos, tienen las características de un circuito resonante con Q varias veces mayor que el que puede obtenerse con un circuito convencional de constante concentradas; la frecuencia de resonancia es fundamentalmente, función de las dimensiones de cristal, del montaje y de la orientación del corte; esto último, la actividad, el coeficiente de temperatura y otras características del cristal.

### **Azúcar**

La sacarosa se llama azúcar, su fórmula química es  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , también conocida como azúcar común o azúcar comestible. La sacarosa es un disacárido compuesto por moléculas de glucosa y moléculas de fructosa, que se deriva principalmente de la caña de azúcar o la remolacha azucarera.

### **Sal de Rochelle**

El tartrato de potasio y sodio  $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$  sal mixta generalmente se llama Salt de Seignette o Salt de la Rochelle. Fue descubierto en 1672 por Pierre Seignette, un farmacéutico en La Rochelle. Es una de las sales más preciadas del ácido tartárico. Con propiedades piezoeléctricas.

### **Topacio**

Es un mineral cristalino en el sistema ortorrómbico. La fórmula general es  $Al_2SiO_4(OH, F)_2$ . El OH y F entre paréntesis indican que la relación entre el fluoruro F y el hidróxido OH puede variar en un amplio rango. Aunque la suma de ellos será constante.



## Minerales de Turmalina

La turmalina es un mineral en silicato. Tiene una fórmula química muy compleja  $(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Al}, \text{Fe}, \text{Li}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Mn})_6 (\text{BO}_3)_3 (\text{Si}_6\text{O}_{18}) (\text{OH}, \text{F})_4$ . La turmalina tiene propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas. Esto significa que bajo presión y cuando se calienta, se acumularán cargas opuestas en ambos extremos. Estas cargas pueden atraer objetos ligeros y darle un nombre, porque Turamali en Ceilán significa piedra que atrae cenizas.

### 2.2.2.2 Materiales Ferroeléctricos y Cerámicas.

Estos materiales se pueden polarizar, aplicando un campo eléctrico externo, y así presentan propiedades piezoeléctricas. Estos materiales pueden ser a también cerámicas diseñadas sintéticamente. Dentro de los materiales sintéticos de alta densidad de energía tenemos las cerámicas, los materiales monocristalinos, los polímeros y películas delgadas (Molina, 2018).

### Cerámicas policristalina

Las cerámicas policristalinas son compuestas por varios cristales ferroeléctricos, formando una estructura policristalina. Son utilizadas para aplicaciones de alta densidad de energía. Un material de alta densidad de energía, se caracteriza por un valor alto del producto de la constante de carga ( $d$ ) y la constante de voltaje ( $g$ ). Para tener un alto valor de  $d \cdot g$  hay que tener en cuenta la ecuación  $|d| = \frac{\epsilon n}{4\pi}$ , donde  $\epsilon$  es la permitividad del material y  $n$  un parámetro del material con límite inferior de 0.5.

A la hora de seleccionar una cerámica para una determinada aplicación, hay que tener en cuenta parámetros como el rango de temperatura en el que opera ( $-20 < T < 80^\circ\text{C}$ ), el rango de frecuencia (10-200Hz), el rango de amplitud de la fuerza externa que se le puede aplicar (0.1-3N) y el tiempo de vida ( $>10^6$  ciclos).

### 2.2.2.3 Material Grafeno.

Según (Zapata, 2017) “el grafeno es una alotropía del carbono consistente en un teselado hexagonal plano (como un panal de abeja) formado por átomos de carbono y enlaces covalentes, formados a partir de la superposición de los híbridos  $sp^2$  de los carbonos en

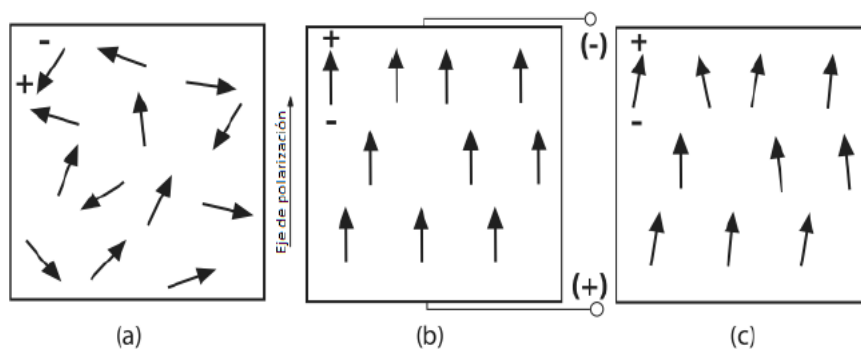
lanzados”. A la lista de las múltiples virtudes podría ahora sumarse su potencial piezoeléctrico.

Un equipo de ingenieros en la Universidad de Houston en Texas ha calculado que mediante la simple estrategia de abrir agujeros en una hoja de grafeno, dispuestos en puntos específicos de la lámina siendo una configuración especial, es factible forzar al grafeno a comportarse igual que un material piezoeléctrico. Los científicos tienen en las sustancias piezoeléctricas un buen recurso para desarrollos de vanguardia, como por ejemplo la recolección de energía mecánica en fuentes difícilmente aprovechables por otros métodos, para fabricar sensores de muy alta precisión.

El grafeno en su forma natural no es un material piezoeléctrico. Pero los ingenieros de la Universidad de Houston predijeron que, si tomaban una lámina de Grafeno de tipo semiconductor o del tipo aislante, y la perforaban abriendo en ella agujeros triangulares en la disposición adecuada, bastaría aplicar una presión uniforme al material para hacer que se comportara como si fuera piezoeléctrico. Los resultados obtenidos por el equipo de Swapnil chandratre y Pradeep Sharma indican que los agujeros triangulares promueven en el grafeno una conducta piezoeléctrica, mientras que los agujeros redondos no tienen ese efecto.

#### ***2.2.2.4 Piezoeléctricos artificiales.***

El piezoeléctrico artificial se produce al exponer un material cerámico a un gran campo eléctrico externo a alta temperatura. Cuando la temperatura baja, el dipolo natural desaparece y reaparece. Bajo estas condiciones, los dipolos adoptan la dirección correspondiente a la del campo de polarización y como resultado, el cuerpo cerámico muestra una elongación en esa dirección. Después de la desaparición del campo de polarización y el enfriamiento del material, los dipolos no vuelven completamente a su posición original, con lo que se obtiene el efecto de polarización remanente del material figura 6, y el cuerpo cerámico se ha convertido permanentemente en un cuerpo piezoeléctrico.



**Figura 6.** Polarización neta de un material cerámico (piezoeléctrico artificial), 2020. Información tomada de investigación directa. Elaborado por el autor.

Proceso de polarización: (a) Antes de la polarización, los dominios de polaridad se orientan aleatoriamente. (B) Aplique un gran campo eléctrico de CC para polarización. (C) Al eliminar el campo eléctrico aplicado, se retiene la polarización restante.

### Sulfato de litio

Este material se considera uno de los receptores más eficaces. Su principal ventaja es que es fácil obtener la mejor amortiguación acústica, mejorando así la capacidad de resolución, sin envejecimiento, y casi no se ve afectado por la interferencia del modo de conmutación. Su desventaja es que es muy frágil, fácilmente soluble en agua y debe usarse a una temperatura inferior a 75 ° C.

### Titanato de bario

Es un óxido de bario y titanio, con la fórmula química:  $\text{BaTiO}_3$ . Es un material cerámico ferroeléctrico con propiedades piezoeléctricas y ligera contracción. En el estado sólido de agregación, según la temperatura, tiene cinco etapas: hexagonal, cúbica, tetragonal, ortogonal y romboédrica (la estructura cristalina se ordena según el descenso de temperatura). En todas las estructuras tiene propiedades ferroeléctricas, a excepción de la cúbica.

A continuación de detalla una tabla con las ventajas y desventajas de los materiales piezoeléctricos más usados.

**Tabla 2.** Características de los materiales usados como piezoeléctrico.

Material	Ventajas	Desventajas
Cuarzo	Se obtiene a partir de cristales naturales.	Se verá afectado en el modo de conversión.
	Tiene una excelente	

---

	estabilidad térmica, química y eléctrica.	Es el menos eficiente entre los generadores acústicos.
	Es muy duro, resistente al desgaste y al envejecimiento.	El procesamiento de baja frecuencia requiere alta presión.  Debe usarse a una temperatura inferior a 550 ° C, porque pierde sus propiedades piezoeléctricas por encima de eso.
Sulfato de litio	Receptor más eficiente.	Muy frágil.
	Fácil de obtener la mejor amortiguación acústica.	Soluble en agua.
	Mejor resolución.	Debe utilizarse a temperaturas inferiores a 75 ° C.
	En el modo de conversión, se ve menos afectado por las interferencias.	
Cerámicos polarizados	Se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación.	La resistencia mecánica es relativamente baja.
	Cuando funcionan a tensiones de excitación bajas, se consideran los generadores ultrasónicos más eficientes.	En algunos casos, los modos de conmutación pueden causar interferencias.
		Tienen tendencia a envejecer.
Titanato de bario	Debido a su módulo eléctrico de alto voltaje, es un buen emisor.	Problemas de acoplamiento y amortiguación.
		Debido a su baja resistencia mecánica y alta impedancia acústica, su uso está limitado a frecuencias inferiores a 15 MHz.  Muestra la interacción entre varios modos de vibración.

---

Metaniobato de bario	<p>Tiene un módulo eléctrico de alto voltaje, por lo que tiene una buena capacidad de transmisión.</p> <p>Similar al cuarzo, tiene una excelente estabilidad térmica, por lo que puede usarse a altas temperaturas.</p> <p>Tiene un alto coeficiente de amortiguación interna, por lo que se considera el mejor material para generar pulsos cortos.</p>	<p>Tiene una frecuencia fundamental más baja y poca resistencia mecánica, por lo que se utiliza principalmente para altas frecuencias.</p> <p>Muestra la interacción entre varios modos de vibración.</p>
Zirconato titanato de plomo	<p>Debido a su módulo eléctrico de alto voltaje, se considera el mejor transmisor.</p>	<p>Sin embargo, debido a su alto coeficiente de deformación, es el más difícil de amortiguar.</p> <p>Recomendado para problemas de penetración</p>

---

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

#### **2.2.2.5 Zirconato Titanato de Plomo.**

Desde el descubrimiento de la ferroelectricidad y piezoelectricidad en materiales cerámicos en la década de 1940, el continuo desarrollo de nuevos materiales y tecnologías ha provocado muchas aplicaciones industriales y comerciales, que están directamente relacionadas con estos fenómenos físicos. Hay muchas aplicaciones de los materiales cerámicos piezoeléctricos. Por un lado, los materiales cerámicos a base de titanato de circonato de plomo (PZT) dominan el campo de los materiales piezoeléctricos en el diseño de la mayoría de dispositivos requeridos por la industria, principalmente por sus aplicaciones en sensores y actuadores. El valor de los parámetros piezoeléctricos está cerca del límite de partículas de fase, por otro lado, es fácil modificar estos parámetros de acuerdo con diferentes dopantes.

Los materiales utilizados para la elaboración de cerámicas piezoeléctricas son principalmente titanato de bario, titanato de circonato de plomo (PZT), niobato de plomo y en menor medida titanato de bismuto, niobato de sodio y titanato de bismuto que tienen valor comercial. dirigir. El titanato de circonato de plomo (PZT) es la cerámica piezoeléctrica más

utilizada en los últimos años. PZT es una solución sólida compuesta de titanato de plomo ( $\text{PbTiO}_3$ ) y circonato de plomo ( $\text{PbZrO}_3$ ), con la fórmula general  $\text{Pb}(\text{TixZry})\text{O}_3$ , donde "x" varía entre 0.10 y 0.60, y "y" está entre 0.90 y 0.60. Entre cambios. 0.40, es decir, la suma de "x" e "y" es igual a 1.

### **2.2.3 Baldosa Piezoeléctrica**

Esta nueva invención funciona a través del uso de cristales, naturales o artificiales, que al momento de involucrarlos a esfuerzos mecánicos sueltan cargas eléctricas acorde con las investigaciones realizadas. Una vez que, se suelta la energía es manejada mediante un prototipado que genera la energía eléctrica, en la que se toma ventaja a la energía cinética con la que se efectúa mediante el impacto al caminar. “La baldosa para suelos generadores de energía consisten en una plataforma cuadrada que tiene en su interior una capa de piezoeléctricos conectados en serie a una batería” (Mata, 2014).

Según (Greiffenstein, 2015) afirma que esta tecnología ofrece la primera forma tangible para que las personas se comprometan con la generación de energía renovable. un solo paso puede producir alrededor de 7 vatios de electricidad, según el peso de la persona. Una vez se capta la energía eléctrica, 5% de ella se utiliza para encender la baldosa y el 95% restante se almacena para su uso posterior o se utiliza directamente en la aplicación para la cual está destinada.

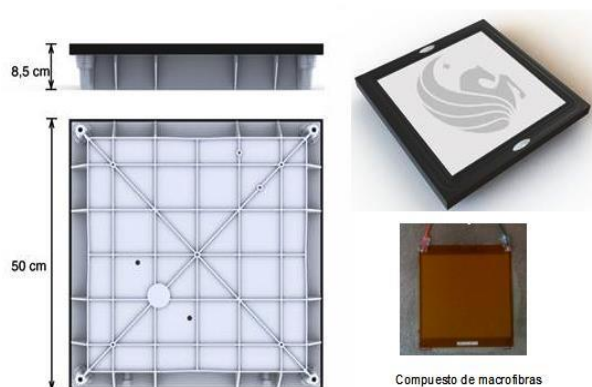
Las baldosas que se utilizan para generar este tipo de energía renovable tienen un tamaño de 45 por 60 centímetros y producen un resplandor de color verde brillante cuando son pisadas. Además, son sostenibles en su fabricación, ya que están hechas de caucho reciclado y otros materiales, también reciclados, diseñados para reemplazar los sistemas de pisos existentes.

#### ***2.2.3.1 Modelos de Baldosas Piezoelectricas***

##### **Baldosa Power Floor**

La baldosa Powerfloor de la empresa POWERLeap, presenta la forma que se muestra en la Figura 7, está es armada sobre una estructura de aluminio de 3 [cm] de altura, 50 [cm] de ancho y 50 [cm] de largo, soportando hasta 100 [KN] de peso. Sobre esta estructura se instalan 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.



**Figura 7.** Baldosa Powerfloor - POWERLeap, 2020. Información tomada de Harvest Energy. Elaborado por el autor.

El material piezoeléctrico utilizado por la baldosa Powerleap, es un compuesto de macrofibras piezoeléctricas (MFC), de 8.4 [cm] de largo y de 8.3 [cm] de ancho, polarizado en paralelo, desarrollado en la NASA Langley Research Center, y que consta de finas fibras de sección transversal rectangular de titanato zirconato de plomo (PZT), incrustadas en una película polimérica adhesiva que combina propiedades eléctricas, térmicas, químicas y mecánicas, para ambientes exigentes con temperaturas extremas y vibraciones, para finalmente ser cubierta con un patrón de electrodos interdigitados (Sodano, 2017).

### Baldosa Pavegen

Las baldosas Pavegen aprovechan la energía cinética que producen la pisada de los transeúntes sobre la baldosa para generar electricidad, están fabricadas en un 80% de materiales reciclados, ya que la parte superior de la baldosa es una goma reciclada al 100% proveniente de neumáticos de automóviles reciclados. Las baldosas son impermeables, por lo que pueden soportar la lluvia, la nieve y el hielo; las pruebas han demostrado que se pueden usar durante al menos cinco años, pero el fabricante dice que se pueden usar durante 20 años en condiciones ideales.

El principio de funcionamiento de la baldosa es mediante el uso de resortes, colocados en la parte interna de la baldosa, que al pisarla accionan los resortes presionando los cristales asimétricos, generando la energía eléctrica, energía que posteriormente se acumula en las baterías. Un paso genera 5 vatios de electricidad, aunque depende del peso de la persona, y cada paso empuja la goma hacia abajo 5 mm, diferencia imperceptible para los peatones (Pavegen, 2016).

Las primeras versiones de baldosas Pavegen, eran rectangulares, la actual generación es triangular Figura 8.



*Figura 8. Baldosas Pavegen, 2020. Información tomada de Pavegen System. Elaborado por el autor.*

#### **2.2.4 Implementaciones recientes de generación de energía a nivel mundial por medio del efecto piezoeléctrico.**

El movimiento libera energía y así es como funcionan casi todos los sistemas, incluidas las vibraciones que también son transformadas en energía por medio de la piezoelectricidad o efecto piezoeléctrico, donde el aprovechamiento de las vibraciones del entorno y las características eléctricas de ciertos materiales logran generar electricidad cuando se someten a un esfuerzo mecánico directo o indirecto, por ejemplo un dispositivo piezoeléctrico o arreglo de materiales piezoeléctricos puede aprovechar vibraciones casi imperceptibles para generar electricidad que pueden ser utilizada para abastecer ciertos consumos de energía, como por ejemplo se detalla en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** Implementación piezoeléctrica a nivel mundial.

<b>Empresa</b>	<b>Proyecto</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Detalles</b>	<b>Año de aplicación</b>
Lord Corporation	Microstrain	Estados Unidos	Su principal mercado es la implantación de sensores piezoeléctricos en campos aeronáuticos, médicos,	1987



---

			automovilísticos y en construcción.	
Scheider Electric	Continuum Control	Estados Unidos	El producto llevaba el nombre de iPower Generator, un dispositivo de mano que transformaba la energía mecánica en energía eléctrica mediante la tecnología piezoeléctrica.	2000
			Este funcionaba con tan solo hacer girar las manivelas del dispositivo para poder suministrar carga a los radios, y equipos que llevaba la expedicionista.	
JR East	East Japan Railway Company	Japón	La empresa JR East realizó la instalación de piezoeléctricos situadas en el paso de las registradoras de acceso a la estación de Marunouchi del metro de Tokio. Las primeras pruebas se realizaron entre los meses de octubre y noviembre del 2006, en este proceso se realizó la instalación de piezoeléctricos, la máxima cantidad de electricidad fue de 10 kW por día (Con esta energía se puede poner en	2006

---

---

servicio un bombillo de 100 W durante 1 minuto), según los aforos esta producción se debió al paso de 800,000 usuarios del metro. En el 2008 en los meses de enero y mayo se llevó a cabo la segunda prueba en la estación de Yaesu, ubicada también en Tokio, donde también se realizó la instalación de piezoeléctricos en las entradas de las registradoras y en escaleras, se amplió la zona de acción a 90 m<sup>2</sup> diez veces más alta que la primera realizada en la estación de Marunouchi, los resultados obtenidos fueron de 500 kW por día (con esta energía se puede poner en servicio un bombillo de 100 W durante 80 minutos).

James Graham, Thaddeus Juszyck	The Crowd Farm	Estados Unidos	Propusieron la creación de una loseta la cual genera energía mecánica por medio del peso de los peatones a través de materiales piezoeléctricos.  El generador está incorporado en la loseta y funciona por el movimiento vertical producido por los	2007
--------------------------------------	-------------------	-------------------	--	------

---

---

peatones.

La propuesta ganó un concurso sobre construcciones sostenibles promovido por Holcim en suiza en el año 2007.

La propuesta ganadora fue el modelo a instalar en la estación de tren en Turín, Italia, cada panel proporcionaba electricidad para 4 bombillos LED's.

Innowattech

Haim  
Abramovich

Israel

Estos piezoeléctricos se 2010  
instalan bajo la capa de  
pavimento asfáltico, la  
energía generada es utilizada  
para la iluminación de las  
vías y para monitorizar los  
datos de circulación.

La primera prueba de esta  
tecnología se realizó en el  
2010 en Israel, donde los  
elementos piezoeléctricos se  
instalaron a una profundidad  
de 0.20 m. Los resultados  
obtenidos durante la prueba  
piloto se demostraron que en  
un tramo de 10 m lineales se  
generaban 2 kW por hora,  
energía suficiente para

---

---

luminar ese mismo tramo de vía.

Mediante extrapolaciones realizadas por los promotores del proyecto se obtuvo que, si se realizaba esta prueba a lo largo de 1 Km, el sistema sería capaz de producir un promedio de 200 kW por hora, pero para lograr dicha meta el tráfico aforado debería superar 600 autobuses o camiones para aprovechar la presión ejercida. La electricidad producida mantiene iluminada el tramo de vía y a las viviendas aledañas al proyecto.

Innowattech	Haim Abramovich	Israel	Se realizó la instalación de placas piezoeléctricas deformables de (0.10X0.10) m los cuales se encuentran ubicados en los rieles. Son elementos que están sustituyendo las juntas entre las vigas y los rieles. El equipo está constituido por cableado, transformador y baterías; la capacidad de generación de los sistemas en vías ferroviarias donde circulen entre 10 y 20 trenes	2006
-------------	-----------------	--------	--	------

---

---

			es alrededor de 120 kW por hora, esta energía puede ser aprovechada para el manejo de la señalización y de las casetas de control.
Ruta N	Calle 10A	Medellín	Esta fue una idea 2012 desarrollada en la ciudad de Medellín, donde se realizó la instalación de piezoeléctricos en una avenida muy concurrida por los ciudadanos los fines de semana debido a las visitas generadas al centro comercial. Estos piezoeléctricos están basados en la tecnología de Innowattech y fue la primera implementación en Latinoamérica.

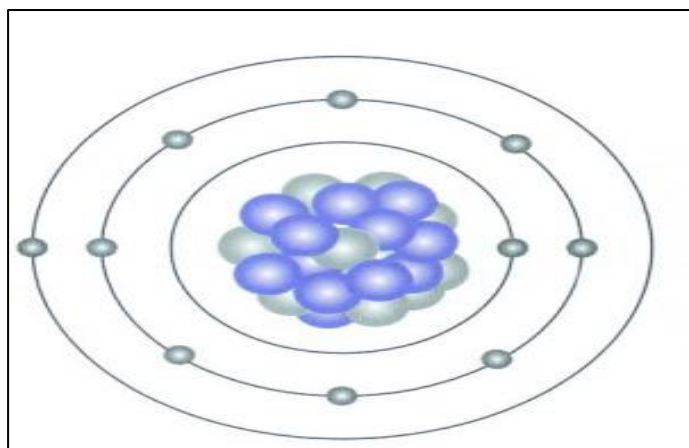
---

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

## 2.3 Marco conceptual

### 2.3.1 La electricidad.

Según (Inova, 2002) , La electricidad es un fenómeno relacionado con la materia y la vida. En todo lo que vemos y todo lo que no hemos observado, está formado por electrones, partículas que orbitan alrededor del núcleo. Estas partículas están relacionadas con fenómenos electromagnéticos, que permiten al ser humano utilizar energía eléctrica.

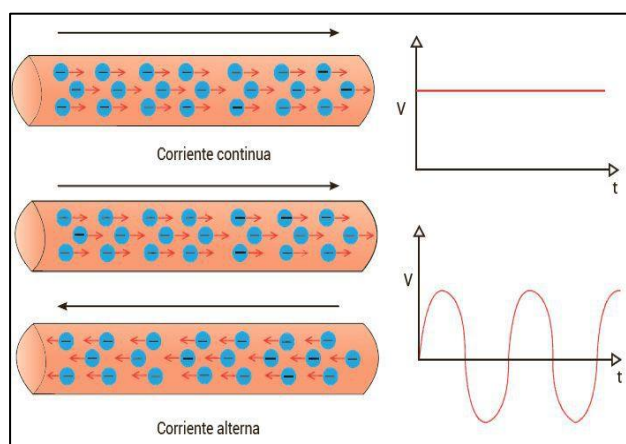


**Figura 9.** Electrones y átomos, 2020. Información tomada de fenercom.com. Elaborado por el autor.

### 2.3.2 Corriente eléctrica

Según (Chevez, 2014), “es el movimiento de las cargas eléctricas a través de cualquier medio que lo pueda conducir, se lo conoce como corriente eléctrica, la cual se origina siempre que dos elementos se pongan en contacto siendo estos de diferente potencial”.

La corriente eléctrica también genera calor, cuando estas atraviesan o fluyen mediante un material conductor, chocando entre sus átomos por lo que las energías de los electrones ceden una parte y los átomos ganan velocidad, manifestando a través del calor.



**Figura 10.** Tipos de corriente, 2020. Información tomada de ABC.com. Elaborado por el autor.

#### 2.3.2.1 Corriente continua.

Según (Orza, 2010) la corriente continua CC/DC es donde los electrones se mueven siempre en el mismo sentido, de su polo negativo al polo positivo que los atrae.

La energía que se necesita para que se muevan son de las pilas y baterías las cuales transforman la energía química en eléctrica, mediante células fotovoltaicas las cuales transforman la luz en electricidad. Los voltajes que proporcionan son constantes en tiempo y

son pequeño: 1,5V; 4,5V; 9V. Lo cual es utilizado en linternas, CD portátiles, móviles, cámaras fotográficas y de video.

### 2.3.2.2 Corriente alterna.

En la corriente Alterna CA/AC los electrones cambian constantemente sus movimientos por lo que su voltaje no se mantiene periódicamente con el tiempo. La corriente alterna más utilizada es la sinoidal y en los hogares tienen valores característicos como 230 v o 120v y 50 Hz de frecuencia.

### 2.3.3 Potencia eléctrica.

Según (Orza, 2010) La potencia eléctrica es una magnitud que mide la energía consumida o generada en la unidad de tiempo. Los equipos de mayor potencia son los que disipan mayor cantidad de energía por unidad de tiempo lo que quiere decir lo que más se consume. La potencia eléctrica es la proporción por unidad de tiempo, o ritmo, con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico, es decir, la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio o watt (W).

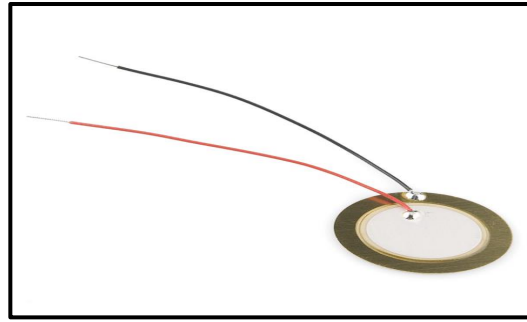
**Tabla 4.** Múltiplos y Submúltiplos de la potencia eléctrica.

Múltiplos		Submúltiplos	
Kilovatio(KW)	$1KW = 10^3W$	Milivatio (mW)	$1mW = 10^{-3}W$
Megavatio(MW)	$1MW = 10^6W$	Microvatio ( $\mu W$ )	$1\mu W = 10^{-6}W$

*Información tomada de potenciaelectronica.com, 2020. Elaborado por el autor.*

### 2.3.4 Sensor piezoeléctrico.

Según (Acosta, 2010), El sensor piezoeléctrico puede estar conformado por materiales cerámicos o cristales iónicos que son capaces de generar pequeñas partes de energía eléctrica cuando son sometidos a una deformidad. Por lo cual se lo conoce como el efecto piezoeléctrico.



**Figura 11.** Sensor piezoeléctrico, 2020. Información tomada de ingmecafenix.com. Elaborado por el autor.

Para la creación de un sensor piezoeléctrico, se realiza primero la reordenación de sus cargas, por lo general siempre están desordenadas por lo cual no es posible generar alguna señal de energía eléctrica figura 12.



**Figura 12.** Cargas eléctricas, 2020. Información tomada de ingmecafenix.com. Elaborado por el autor.

Una vez donde se quita el campo eléctrico las cargas se quedan libres por lo que al generar una presión en ellas se vuelven a ordenar la carga eléctrica necesaria o deseada.

### 2.3.5 Formulación matemática del efecto piezoeléctrico.

Los experimentos realizados por los hermanos Curie, demostraron que la densidad de la carga en la superficie del material al aplicar una fuerza externa es proporcional a la tensión mecánica aplicada al material, como se indica en la ecuación (1), por su parte; el efecto piezoeléctrico inverso el cual consiste en el material se deforma a causa de un campo eléctrico, puede ser expresado como indica la ecuación (2) (Fuentes, 2015).

No obstante, los efectos piezoeléctricos directos e inversos pueden ser definidos matemáticamente de diferentes formas empleando diferentes constantes y magnitudes físicas en consideración a las propiedades del material donde, Según la disposición de los electrodos y la dirección de polarización en el elemento piezoeléctrico, se obtendrá una señal eléctrica proporcional a la tensión en una dirección dada La ecuación (3) expresa el efecto



de acoplamiento debido a la deformación y cambios del campo eléctrico. Ortogonal (Moreno, 2016).

$$P = dT \quad (1)$$

$$S = dE \quad (2)$$

$$D_i = \varepsilon_i E_i + d_{ij} T_j \quad (3)$$

Dónde:

- $P$ , es el vector de polarización eléctrica [*Coulomb/metros<sup>2</sup>*] a causa del efecto piezoeléctrico, magnitud igual a la densidad en la superficie considerada.
- $d$ , es el coeficiente de deformación piezoeléctrica [*metros/Voltios*].
- $T$ , es la tensión mecánica [*Newton/metros<sup>2</sup>*] a la que el material es sometido (Universidad de Navarra, s.f.).
- $S$ , es la deformación unitaria a causa del efecto eléctrico.
- $E$ , es la magnitud del campo eléctrico [*Newton/Coulomb*] aplicado al material (Universidad de Navarra, s.f.).
- $d_{ij}$ , es el tensor de las constantes de carga piezoeléctricas, generalmente denominadas simplemente constantes piezoeléctricas.
- $D_i$ , es el vector de desplazamiento eléctrico.
- $E_i$ , es el vector de campo eléctrico.
- $\varepsilon_i$ , es el tensor de conductividad.
- $T_j$ , es el tensor de tensión mecánica.

### 2.3.6 Transducción Piezoeléctrica.

La capacidad de ciertos mecanismos para convertir una forma de energía en otra forma (convertir la energía mecánica en energía eléctrica) ha sido objeto de muchos estudios. La vibración de los elementos se puede convertir en energía eléctrica a través de tres mecanismos básicos: Transducción Electroestática, Transducción Electromagnética, y Transducción Piezoeléctrica, (Siles, 2017).

En la transducción electromagnética (inductiva); la energía proviene del movimiento relativo entre una bobina y un campo magnético, en la transducción electrostática

(capacitiva); la energía proviene del movimiento existente entre dos conductores y en la transducción piezoeléctrica; la energía proviene del aprovechamiento de las vibraciones del entorno y las características eléctricas de ciertos materiales, por ejemplo; materiales con capacidad para generar energía eléctrica cuando se someten a esfuerzos mecánicos (efecto piezoeléctrico directo), y también se ve afectada su forma, si son sometidos a una carga eléctrica (efecto piezoeléctrico inverso), (Roundy, 2016)

En la transducción piezoeléctrica, la generación de energía eléctrica a partir de energía ambiental ha permitido en los últimos años utilizar el efecto piezoeléctrico en el suministro de dispositivos de baja potencia. (Roundy, 2016).

### **2.3.7 Obtención de energía del cuerpo humano.**

#### *2.3.7.1 El cuerpo humano como fuente de energía.*

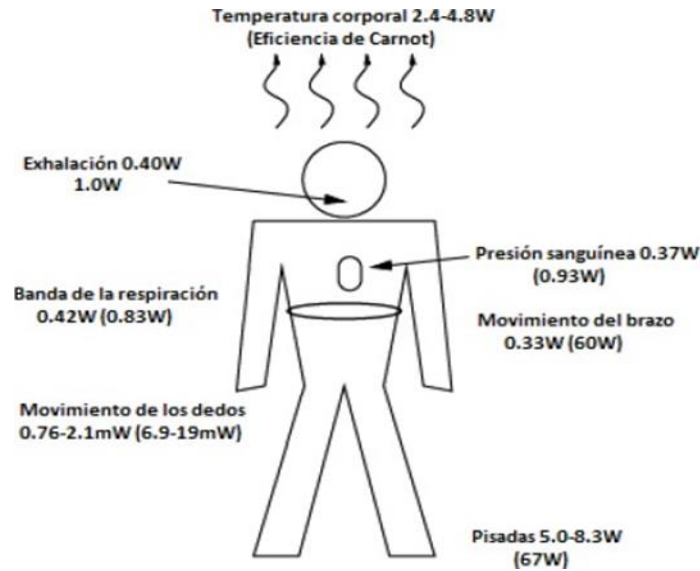
El cuerpo humano, es un depósito de energía que puede ser utilizado para generar electricidad, dado el funcionamiento del mismo o la misma ejecución de las diferentes actividades donde este interviene que de alguna forma pueden ser aprovechadas, por ejemplo; el calor corporal, la respiración, la presión arterial, el movimiento de los brazos, la actividad del caminar, por citar algunas.

Específicamente para caminar, las estadísticas muestran que una persona puede caminar más de 200 millones de pasos en su vida., lo que ligado al principio universal de la energía (Ley de la conservación de la energía), la energía adopta varias formas al transferirse, llegando a producir cambios en los cuerpos y sin embargo en todos estos cambios; la energía ni se crea, ni se destruye, solo se transforma. Así entonces, las energías alternativas limpias presentes de forma potencial en la naturaleza, específicamente en el cuerpo humano cuando realiza actividades como el caminar, presentan posibilidades de utilización prácticamente ilimitada; que, aunque no sea continua, produce una energía que puede ser almacenada para proporcionar una fuente constante, en este caso en específico energía eléctrica.

#### *2.3.7.2 La actividad física del caminar.*

Autores como Starner y Paradiso en el capítulo Human Generated Power for Mobile Electronics del libro Low-Power Electronics Design, publican el estudio de la recuperación de la energía que consume el cuerpo humano, Figura 13, cuando lleva a cabo alguna

actividad física, con el fin de usar ésta para el abastecimiento de dispositivos electrónicos portátiles (Starner, 2003).



**Figura 13.** Recuperación de la energía que consume el cuerpo humano, 2020. Información tomada de Starner. Elaborado por el autor.

Los estudios realizados por Starner y Paradiso, concluyen que la mayor cantidad de energía que puede ser recuperada se encuentra en las pisadas cuando se camina, entre 5 y 8,3 Watts de los 67 Watts que son consumidos en esta actividad, considerando que los 67 Watts se calculan de un hombre de 68 kg (kilogramos) de peso, que caminando a una velocidad de 3,5 millas por hora o 2 pasos por segundo, a una caída del talón de 0,05 metros de altura distancia vertical aproximada del desplazamiento del talón en la marcha humana, (Fischer, 1987). En la ecuación (4) se detalla el procedimiento matemático planteado.

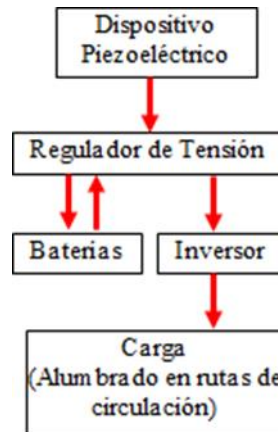
$$(68\text{kg})(9,8 \frac{m}{s^2})(0,05m)(2 \frac{\text{pasos}}{\text{seg}}) = b/\text{watts} \quad (4)$$

Con base en estudios de esta naturaleza, diversos investigadores se han interesado en el diseño de sistemas capaces de aprovechar la energía que puede ser generada con actividades propia del cuerpo humano, haciendo la conversión de energía mediante transducción piezoeléctrica.

### 2.3.8 Sistema Piezoeléctrico.

Para la implementación del sistema piezoeléctrico como fuente de energía segura y confiable se requiere integrar los dispositivos piezoeléctricos (baldosas piezoeléctricas) a un regulador de tensión, un inversor o un controlador de carga más baterías, los cuales pueden

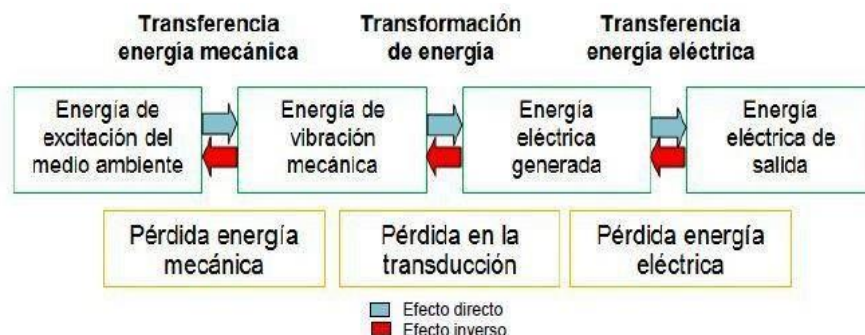
ser enlazados como muestra en la Figura 14, y donde el sistema piezoeléctrico igualmente puede estar compuesto por un conjunto de baldosas piezoeléctricas que capten las pisadas de quienes transitar sobre ellas, y así genere la corriente que se acumule en las baterías, que después se utilice por medio del regulador de tensión y el inversor de corriente continua, almacenada en las baterías, en corriente alterna.



**Figura 14.** Esquema estructural del Sistema de Generación Piezoeléctrica, 2020. Información tomada de investigación directa. Elaborado por el autor.

Los Dispositivos Piezoeléctricos, o Baldosas Piezoeléctricas para nuestro caso de investigación, aprovechan el efecto piezoeléctrico directo. Constructivamente, en la baldosa se coloca dos placas, separadas, y con la capacidad de desplazarse una respecto de otra, al ser pisadas por ejemplo utilizando resortes. En medio de las placas, se ubica el material piezoeléctrico y al ejercer presión sobre la baldosa, las placas se desplazan y oprimir el material piezoeléctrico y es cuando la energía mecánica se convierte en energía eléctrica.

No obstante, en el proceso de transformación de energía en el efecto piezoeléctrico la energía mecánica que proviene del entorno y que excita el dispositivo parte se convierte en energía eléctrica y como en cualquier fenómeno físico parte en pérdidas durante todo el proceso, tal como se muestra en la Figura 15.



**Figura 15.** Proceso de transformación de energía, efecto piezoeléctrico, 2020. Información tomada de investigación directa. Elaborado por el autor.

### **2.3.9 Regulador de tensión.**

La función principal de un regulador de tensión en un sistema piezoeléctrico es proteger a las baterías de sobrecargas o descargas excesivas y de cortocircuitos, dado que cualquier instalación eléctrica que utilice cargas impredecibles que pueda sobrecargar o descargar las baterías, requiere de un regulador de carga, la falta del mismo puede ocasionar una reducción de la vida útil de las baterías y una reducción de la disponibilidad de carga (Henriquez, 2015).

Así entonces, el regulador controlara el rango admisible de tensión en la batería del sistema piezoeléctrico, previendo que el valor de tensión que ingresa a la batería no exceda, ni este por debajo del rango admitido por la batería, para esto; a medida que la diferencia de tensión entre regulador y la batería disminuye, el regulador incrementa la tensión de carga (carga intensiva), por contrario el regulador disminuye la tensión cuando la carga de la batería se aproxima al 100% (absorción), y el regulador sólo suministra una tensión de mantenimiento a la batería para que esta siga cargada al 100 %. (flotación). Para el sistema piezoeléctrico objeto de estudio; el regulador será seleccionado calculando entre el 20% y/o el 25% más de la máxima corriente de la intensidad de carga o corriente de consumo del sistema.

### **2.3.10 Batería o acumulador de energía generada.**

Para almacenar la energía generada por los dispositivos piezoeléctricos se considera la utilización de baterías. Las baterías almacenaran la energía producida por los piezoeléctricos que no se consuma inmediatamente por la carga, para el caso de la investigación la utilización de baterías permite acumular la energía generada por el arreglo de baldosas piezoelectricas.

Las baterías o acumuladores son uno de los elementos importantes de esta forma de generar energía, su capacidad varía según su tipo, su calidad de construcción, la temperatura de trabajo, vejez, y el estado de descarga. Los tipos de baterías encontradas en el mercado son de construcción en base de plomo (acumuladores), entre estas están las baterías líquidas, las cuales son las más antiguas y su simple producción permiten precios favorables, existen en versión abierta con tapas que dejan sustituir el agua o en versión libre de mantenimiento que son cerradas, pero con válvulas para que posibles gases puedan escapar durante cargas excesivas, las baterías tipo VRLA (abreviación del inglés: Valve Regulated Lead Acid battery), estas baterías modernas tampoco son completamente selladas, pero contienen una

tecnología que combinan el oxígeno e hidrógeno que sale de las placas durante la carga y así eliminan la pérdida de agua si no son sobrecargadas, existen dos tipos principales; los de consistencia de Gel y los AGM (Absorbed Glass Mat), donde el ácido es fijado en fibra de vidrio, otros tipos de baterías, específicamente las construidas de Ion de Litio (Li-Ion) como las usadas en celulares y computadoras con características superiores están en desarrollo y cada vez más sustituyen las de plomo (Volt, 2016)

### **2.3.11 Inversor o conversor CC/CA.**

En la generación de energía por medio de dispositivos piezoeléctricos debe contemplarse la conversión de tensión, siendo esta la encargada de transformar y adaptar la energía generada por el piezoeléctrico a las características eléctricas de la carga, para la investigación se determina que la conversión se hace utilizando un inversor de corriente continua a corriente alterna (CC/CA).

Para el dimensionamiento del inversor CC/CA, se debe considerar la capacidad que el inversor puede soportar durante su funcionamiento normal de forma continua, ya que estos son menos eficientes cuando se utilizan a un porcentaje bajo de su capacidad, por lo que debe ser elegido con una capacidad lo más cercano posible a la de carga de consumo, lo cual no debe ser menor al 80% de la capacidad nominal del inversor.

## **2.4 Marco legal**

Los organismos gubernamentales como es la Constitución de la república del Ecuador que presenta la máxima ley en el país en la sección séptima se refiere a las energías renovables que ayuden al medio ambiente promoviendo el desarrollo energético, otro organismo gubernamental que incluye en sus secciones acerca de las diferentes formas de obtención de energía eléctrica es la Agencia de Regulación y Control de Electricidad se detallan a continuación las regulaciones que avalan para el desarrollo de este trabajo.

### **2.4.1 Constitución de la república del Ecuador 2008**

#### **Biosfera, ecología urbana y energías alternativas**

**Art. 413.-** El estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el

equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua (CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR, 2008).

**Art 15.-** El Estado promueve en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanza en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afecta el derecho al agua (CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR, 2008).

#### **2.4.2 Ley orgánica del servicio de energía eléctrica (LOSPEE)**

##### **Programa de Energización Rural**

**Art. 63.-** El estado promoverá y financiará, de manera prioritaria, los proyectos de desarrollo de la electrificación rural, especialmente en zonas aisladas de sistemas de distribución. Los valores anuales, necesarios para la ejecución del mismo, serán gestionados por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable ante el Ministerio de Finanzas. (Ley Organica del Servicio Publico de Energia Electrica, 2015).

##### **Gestión de fuentes energéticas y energías renovables no convencionales**

**Art. 26.- Energías renovables no convencionales.** - El ministerio de Electricidad y Energía Renovables Promoverá el uso de tecnologías limpias y energías alternativas, de conformidad con lo señalado en la Constitución que propone desarrollar un sistema eléctrico sostenible, sustentable en el aprovechamiento de los recursos renovables de energía (Ley Organica del Servicio Publico de Energia Electrica, 2015).

La electricidad producida con este tipo de energías contara con condiciones preferentes establecidas mediante regulación expedida por el ARCONEL.

Es por ello que el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable como órgano rector del sector eléctrico, tiene la tarea de diversificar las fuentes de producción de energía del país, que se hace menos dependiente del petróleo como materia prima fundamental para lograr el cambio de la matriz energética del país.

Entre las energías no convencionales con mayor potencialidad en el Ecuador se encuentra: la energía solar, la biomasa, la geotermia y la eólica, existen estudios y proyectos sobre el uso de estos tipos de energías. Por supuesto que la energía hidráulica representa el aporte fundamenta de este tipo en el Ecuador

## **Capítulo III**

### **Metodología y propuesta de la investigación**

En este capítulo se detallará una explicación de cada uno de los pasos que se realizaron a lo largo de la investigación para llevar a cabo la presente investigación. Documentando cada paso y procedimiento de los que fueron utilizados, para de una forma u otra dar la respectiva solución a la problemática planteada.

#### **3.1 Definición de la propuesta**

En este capítulo se demostrará el objetivo de esta investigación, la cual es realizar el análisis funcional y económico para implementar generadores de energía eléctrica mediante celdas piezoelectricas en alguna institución educativa o lugar público, el cual determinara el si es viable su implementación.

#### **3.2 Planificación del proyecto**

El objetivo principal del presente trabajo de titulación es realizar el análisis funcional y económico para la utilización de generadores con sistemas piezoeléctricos para un área educativo o institucional. En este caso se tomó cierta área de la facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Guayaquil, la cual es el pasillo de la carrera de Ingeniería de Teleinformática, que pueda determinar si es aplicable o no realizar la transición de obtención de energía eléctrica convencional dispuesta por la empresa eléctrica a la utilización de baldosas piezoelectricas para la obtención de energía renovable proporcionada por la fuerza del ser humano al pisar sobre las baldosas para generar energía eléctrica y alimentar el sistema de iluminación de lámparas de área seleccionada de estudio de la facultad mediante este tipo de sistema.

#### **3.3 Prueba de tensión realizadas al piezoeléctrico (PZT)**

Para probar un material piezoeléctrico (Zircanato Titanato de Plomo), es necesario conocer la fuerza aplicada al material para obtener una diferencia de potencial en su superficie. Por esta razón, se considera en Newton. En el Sistema Internacional de Unidades, Newton (N) es la unidad de fuerza y lleva el nombre de Isaac Newton. Newton se define



como la fuerza requerida para proporcionar una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$  un objeto con una masa de 1 kg.

$$1N = 1 \left( \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

Considerando que la fuerza a aplicar al elemento piezoeléctrico es proporcional a la masa de la persona, según las características del peso, se aplicarán diferentes fuerzas al elemento piezoeléctrico, por lo que se recomiendan las siguientes masas (52,5 kg, 69 kg y 85 kg). Considere que la fuerza gravitacional en la Tierra es  $9.80665 \text{ m/s}^2$ .

Se obtienen las siguientes fuerzas aplicadas al elemento:  $F=ma=\text{Peso}$

**Tabla 5.** Calculo de la fuerza respecto a la masa

Persona	Masa aproximado (kg)	Fuerza gravitacional de la tierra $\text{m/s}^2$	Cálculo de la fuerza	Fuerza (N)
1er. persona	52.5	9.80665	$N = (52.5 \text{ kg}) \left( 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$ =	N=514.84
2da. persona	69	9.80665	$N = (52.5 \text{ kg}) \left( 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$ =	N=676.65
3ra. persona	85	9.80665	$N = (52.5 \text{ kg}) \left( 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$ =	N=833.56

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

Considere la aplicación de una fuerza de 833.56 N por una tercera persona, porque esto nos permitirá observar la diferencia de potencial generada a la fuerza máxima. En la medición de voltaje pico a pico obtenida del terminal piezoeléctrico, las cuales estos valores fueron investigados de pruebas realizadas en un trabajo de tesis que con la ayuda de un osciloscopio digital se obtuvo las mediciones de tensión producida al aplicarle la fuerza de 833.56, teniendo como resultado tensión pico a pico de 9.20 volts pico-pico que genera un material piezoeléctrico. A continuación, procedemos a obtener la tensión rms.

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Donde:

$V_p$ = Tensión pico que es el valor máximo que obtiene la onda.

$V_{rms}$ = Tensión eficaz

**Tabla 6.** Tensiones resultantes

<b>Tensión pico-pico <math>V_{pp}</math> (volts)</b>	<b>Tensión pico <math>V_p</math> (volts)</b>	<b>Tensión eficaz <math>V_{rms}</math> (volts)</b>
9.20	4.6	3.25

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

Con base en esta observación, aplicando una fuerza de 833.56 N al material piezoeléctrico, obtenemos un voltaje de 3.25 voltios efectivos.

### 3.4 Unidad y configuración de piezoeléctricos

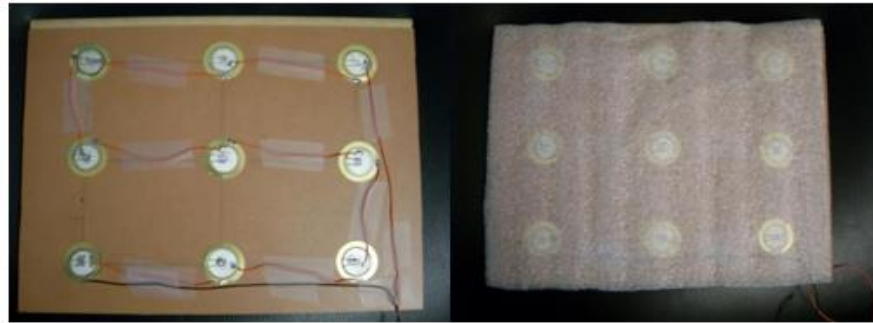
Una vez testeado el material piezoeléctrico PZT, y tras obtener los correspondientes resultados de la tensión que puede generar el elemento piezoeléctrico, se puede calcular analíticamente el valor de tensión del material que se ha formado como una unidad de múltiples elementos piezoeléctricos. En un circuito en serie, es una configuración en la que uno o más terminales del dispositivo están conectados secuencialmente. El terminal de salida de un dispositivo se conecta al terminal de entrada del siguiente dispositivo. A través de este terminal, la diferencia de potencial entre los terminales extremos asociados es igual a la suma de los dos elementos.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_n$$

### 3.5 Pruebas realizadas al piso generador con celdas piezoelectricas

Una vez realizado el piso generador de energía eléctrica que son pequeñas baldosas de 20x20cm en cual se tomó como material el piso laminado porque absorbe la presión que se ejerce sobre el al caminar.

Donde esté instalado se coloca en la parte interior el llamado “bajo piso”, que es una sábana de hule espuma. A continuación, se puede apreciar en la figura 16 como serian colocados las celdas piezoelectricas y que distancia deben contener. En una baldosa se conectarán en serie 10 sensores o celdas piezoelectricas.



**Figura 16.** Colocación de celdas piezoelectricas y espuma de hule, 2020. Información tomada de tesis de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y eléctrica. Elaborado por Cortez y Pineda.

### 3.5.1 Prueba de tensión realizadas a un piso generador con celdas piezoelectricas.

De la misma forma que se le aplico al elemento piezoeléctrico, tambien al piso generador de energía se considera utilizar la misma fuerza de 833.46 N que ejerce la tercera persona, en donde se observa cual es la diferencia de potencial producida a la máxima fuerza. El resultado es un valor pico a pico de 92 voltios, a partir del cual se puede obtener el voltaje rms.

Por tanto, los elementos piezoeléctricos conectado en serie a esta estructura aumenta la tensión del terminal de salida. Los voltajes en serie se suman por lo que con las 10 celdas piezoelectricas conectadas en serie genera un valor total por baldosa de:

$$V_T = 10(9.20pp)$$

$$V_T = 92vpp$$

**Tabla 7.** Tensiones resultantes piso generador

Tensión pico-pico Vpp (volts)	Tensión pico Vp (volts)	Tensión eficaz Vrms (volts)
92	46	32.5

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

Con ello se observa que el piso aplicándole una fuerza de 833.56 N obtenemos una tensión de 32.5 volts eficaces.

### 3.5.2 Prueba de corriente realizada a un piso generador con celdas piezoelectricas.

Se realiza una prueba para saber que corriente proporciona el piso generador de energía eléctrica, para ello se colocara en la una de las terminales de salida de la baldosa una resistencia de 8.2 MΩ en serie, y con la ayuda de un multímetro en su función de

amperímetro para registrar el valor de la corriente como se observa en la figura 17 la conexión de la prueba.

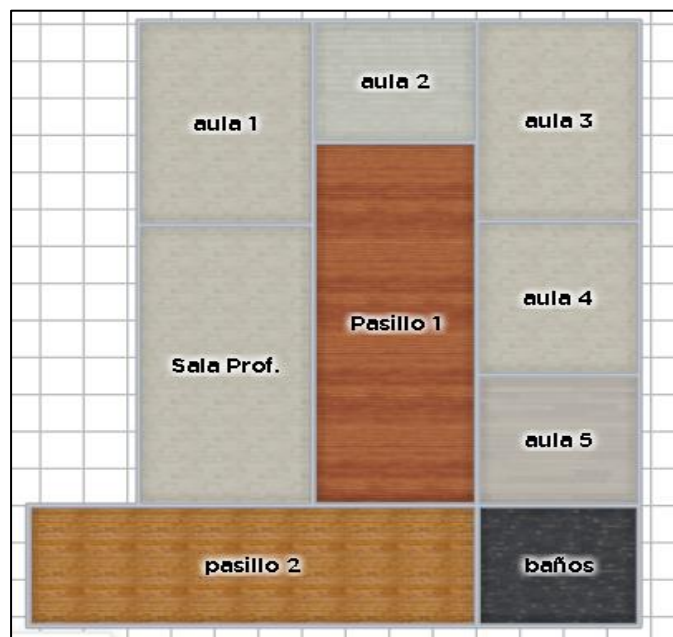


**Figura 17.** Prueba de corriente, 2020. Información tomada de tesis de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y eléctrica. Elaborado por Cortez y Pineda.

Teniendo como resultado un valor promedio de  $2.30 \mu A$ , que se genera por baldosa donde se encuentran las 10 celdas piezoelectricas entre conectadas en serie.

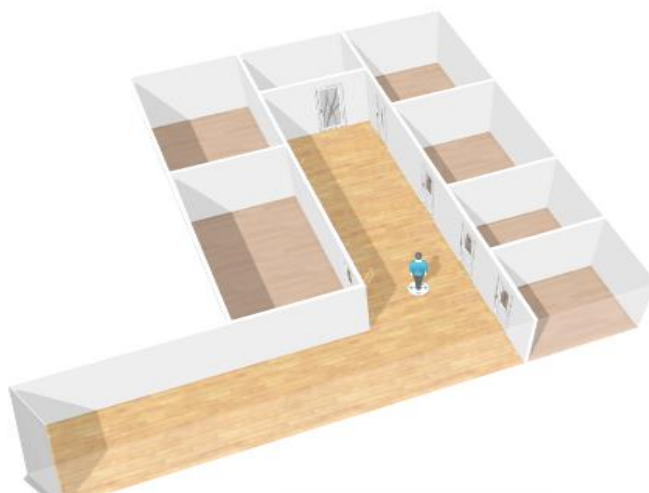
### 3.6 Espacio determinado para el estudio de implementación del sistema piezoeléctrico

El espacio donde se realizará el estudio de la posible implementación a futura del sistema piezoeléctrico, es uno de los pasillos del área de la carrera de Ingeniería en Teleinformática que se encuentra junto a la sala de profesores de la carrera, en donde se estima que tiene como medida de superficie del pasillo de  $10 \text{ m}^2$  en la siguiente figura 18 se puede apreciar el espacio determinado.



**Figura 18.** Plano del espacio de implementación, 2020. Información tomada de Programa de Diseño y Decoración HomeByMe. Elaborado por el Autor.

En el pasillo donde se toma como medio de estudio para el análisis, considerando que cada baldosa tiene una superficie de 20 cm<sup>2</sup>, por lo cual se emplearan 250 baldosas en los 10 m<sup>2</sup> de superficie del pasillo.



**Figura 19.** Plano 3D del espacio de implementación, 2020. Información tomada de Programa de Diseño y Decoración HomeByMe. Elaborado por el Autor.

### 3.6.1 Estimación de desplazamiento de los alumnos y el tiempo en el pasillo.

Considerando que en la carrera de Ingeniería en Teleinformática se tuvo la cantidad de 600 estudiantes matriculados en el semestre anterior del ciclo 2019-2020 CII, en donde transitaban diariamente por el pasillo de estudio del sistema piezoeléctrico. En donde la jornada de clases es de 7 am a 15 pm en donde cada clase tiene una hora de duración, por lo cual los estudiantes al desplazarse de una clase a otra clase por cada hora, se estima un tiempo de desplazamiento de 10 minutos por cada hora de cambio de clase.

Por lo cual se toma como tiempo estimado de desplazamiento de 10 minutos, desde el inicio de la jornada hasta finalizar la jornada se tienen 10 desplazamientos. Estos valores no son valores reales fueron considerados para el estudio, son valores estimados según la jornada y la observación del tiempo que los alumnos tardan de ir de un aula a otra.

## 3.7 Características técnicas y costo de material piezoeléctrico

La calidad de los materiales piezoeléctricos es el conjunto de propiedades que poseen, las cuales satisfacen ciertas necesidades de acuerdo a su utilización.


Las propiedades o características piezoeléctricas que presentan estos materiales son importantes para este análisis, ya que se desea obtener principalmente una tensión y una corriente con un mínimo esfuerzo aplicado sobre el material piezoeléctrico, esto depende de

la calidad que presenta el material, así como el proceso de elaboración, y con esto influye directamente en el costo que presenta este material para su adquisición.

Las características que presentan los diferentes materiales piezoeléctricos con respecto a cada fabricante son distintas, esto representa que cada material presente una mayor o menor calidad, esto puede ser observado al ser comparados en la siguiente tabla.

**Tabla 8.** Costos de Materiales piezoeléctricos.

Imagen	características	Costo por unidad	Cantidad de orden mínima	Lugar del Origen
	Diámetro del disco: 27 mm Frecuencia: 2.5Khz $\pm$ 0.5Khz Capacitancia 200.0nF $\pm$ 30% a 100Hz Voltaje Máximo: 15vp-p	\$ 0.30	1500 piezas	Guangdong, China
	Frecuencia: 3 KHz $\pm$ 0.5Khz Capacitancia 300.0nF $\pm$ 30% a 100Hz Voltaje Máximo: 23vp-p	\$ 1.00	1500 piezas	Guangdong, China
	Diámetro del disco: 29 mm Frecuencia: 1.5Khz $\pm$ 0.5Khz Capacitancia 150.0nF $\pm$ 30% a 100Hz Voltaje Máximo: 30vp-p	\$ 1.00	1000 piezas	Ningbo, China
	Diámetro del disco: 20 mm Frecuencia: 2.5Khz $\pm$ 0.5Khz Capacitancia 100.0nF $\pm$ 30% a 100Hz	\$ 2.00	1000 piezas	Ningbo, China

	Voltaje Máximo: 12 vp-p			
	Diámetro del disco: 25 mm	\$ 3.00	1000 piezas	Jiangsu, China
	Frecuencia: 1.5Khz $\pm$ 0.5Khz			
	Capacitancia 300.0nF $\pm$ 30% a 100Hz			
	Voltaje Máximo: 25vp-p			
	Diámetro del disco: 26 mm	\$ 3.28	100 piezas	Pozuelo de Alarcón, Madrid
	Frecuencia: 3.5Khz $\pm$ 0.5Khz			
	Capacitancia 100.0nF $\pm$ 30% a 100Hz			
	Voltaje Máximo: 40 vp-p			
	Diámetro del disco: 30 mm	\$ 4.94	250	Querétaro, México
	Frecuencia: 2.5 Khz $\pm$ 0.5Khz			
	Capacitancia 250.0nF $\pm$ 30% a 100Hz			
	Voltaje Máximo: 30vp-p			

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

La calidad de un piezoeléctrico es de acuerdo al precio establecido por cada fabricante ya que la elaboración de estos materiales consiste de diferentes técnicas de elaboración, es por ello que cada uno de estos materiales poseen distintas características.

### 3.8 Calculo y análisis de generación de energía del sistema piezoeléctrico

Para el análisis del piso generador de energía con piezoeléctricos de mejor calidad y de igual manera el cálculo de la tensión, corriente y potencia obtenidos para determinada carga.

Si se implementara el piso generador de energía en la pasillo de la carrera de Ingeniería de Teleinformática considerando que tiene una superficie de  $10m^2$ , se utilizaran 250 placas

de piso generador de energía eléctrica, cada placa con una superficie de  $0.002 \text{ m}^2$  en la que se distribuyen 10 piezoeléctricos.

Tomando en cuenta la tensión y corriente promedio generada por una placa de piso generador de energía, para la superficie antes mencionada, las placas se conectarían en paralelo de manera que la tensión permanece constante y la corriente se suma.

Cálculos:

$$V_{promedio} = 32.5 \text{ V} \quad I_{promedio} = 2.30 \mu\text{A}$$

$$I_{total} = (2.30 \mu\text{A})(250) = 575 \times 10^{-6}$$

$$P = VI$$

$$P = (32.5)(575 \times 10^{-6})$$

$$P = 18.7 \text{ mW}$$

$$P = 0.0187 \text{ W}$$

El monto estimado utilizando piezoeléctricos que tienen un costo de USD \$ 0.30 para cubrir un área de  $10 \text{ m}^2$  sería de \$ 750.

El tiempo estimado del paso de los alumnos en el pasillo es de 10 minutos de duración de pasar de una clase a otra suponiendo que cada hora se cambia de clase, adicional se toma como requisito que se debe realizar 20 pisadas en las baldosas lo que produce:

$$Ep = (20)(0.0187 \text{ W})(0.167 \text{ h})$$

$$Ep = 0.062 \text{ Wh}$$

Se realiza también el cálculo de la energía potencial que se genera en el pasillo a lo largo de la jornada de clases, teniendo en cuenta que son 10 minutos de pasar de una clase a otra por cada hora, comenzando desde las 7 am hasta las 3 pm que dura una jornada de clases diaria propuesta, serían 10 desplazamientos de los alumnos durante el día de clases con lo que obtenemos:

$$(10 \text{ desplazamientos})(10 \text{ minutos}) = 100 \text{ minutos}$$

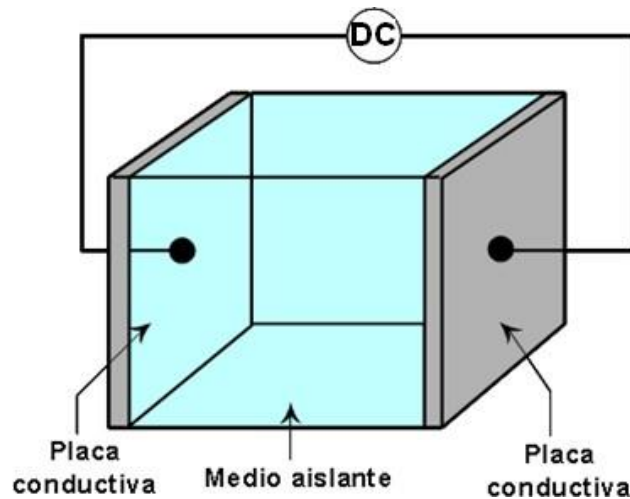
$$Ep = (20)(0.0187 \text{ W})(1.67 \text{ h})$$

$$Ep = 0.625 \text{ W/día}$$

Una vez obtenida la energía eléctrica es almacenada en baterías en este caso se utilizarán baterías a base de capacitores, una nueva tecnología en acumuladores. Los capacitores son elementos de dos terminales que constan de dos placas conductoras separadas por un



material no conductor donde la energía eléctrica se almacena en las placas, observe el siguiente diagrama de la batería en la figura 24.



**Figura 20.** Principio de operación del capacitor, 2020. Información tomada de investigación directa. Elaborado por el autor.

La capacidad de carga de un capacitor se denomina capacitancia, y es adquirida por los capacitores de manera casi instantánea. Estas baterías capacitivas se han logrado fabricar con una carga máxima de 52 kilowatt/hora, lo que equivale a 10 veces la capacidad de las actuales baterías.

Una vez almacenada la energía eléctrica en las baterías capacitivas podrá usarse en pequeñas cargas como son lámparas de bajo consumo.

### **3.8.1 Análisis de viabilidad de la energía generada para el consumo del sistema de iluminación.**

Según información tomada por investigación propia, donde se establece que cada aula que se encuentra alrededor del pasillo que se tomó como punto geográfico de implementación del sistema piezoeléctrico. Donde cada aula contiene en su sistema de iluminación 6 lámparas fluorescentes de 40 W de potencia de consumo.

Calculando que por cada aula existen 6 lámparas de 40 W, tenemos como total:

$$\text{Total de lámparas} = (5 \text{ aulas}) (6 \text{ lámparas})$$

$$\text{Total de lámparas} = 30 \text{ lámparas}$$

Sabiendo que cada lámpara el consumo de energía es de 40 W se calcula el total de energía en Watts de todas las lámparas.

$$\text{Total de Potencia(W)} = (30 \text{ lámparas}) (40 \text{ W})$$

$$\text{Total de Potencia(W)} = 1200\text{W}$$

Como se obtuvo que la potencia generada del sistema piezoeléctrico es de 0.062 Wh, con el resultado del consumo de las lámparas no funcionaría ya que no cargaría las baterías, la potencia (W) generada por el piso generador de energía eléctrica no abastecería para la demanda de energía requerida, y no sería viable su implementación.

### 3.8.2 Estimación de costo del sistema piezoeléctrico con materiales piezoeléctricos.

**Tabla 9.** Costo del sistema piezoeléctrico con materiales piezoeléctricos.

Equipo	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Celda Piezoeléctrica	2500	0.30	750
Regulador	1	125	125
Inversor 6000 W	1	359	359
Batería	1	437.69	437.69
Total			1671.69

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

El costo de instalación del Sistema Piezoeléctrico con materiales piezoeléctricos está en los \$ 1671.69 solo considerando los componentes más necesarios para su implementación, además los valores presentados son considerados en la fecha actual para el análisis, también no se contempla el costo por mantenimiento de los equipos dado su tiempo de vida útil, ni el costo por instalación de los equipos.

### 3.9 Análisis de energía eléctrica mediante baldosas piezoelectricas

Para la selección de los dispositivos piezoeléctricos se considera disponer de una plataforma piezoeléctrica de un metro cuadrado ( $1\text{m}^2$ ), enlazando de baldosas piezoelectricas previo al pasillo del área de la carrera de ingeniería en Teleformática que se tomó como punto de delimitación del estudio, teniendo como zona más transitada durante los cambios de horas de clases.

Entre las diferentes tecnologías consultadas; la baldosa Pavegen V3, Triangular, la baldosa Sustainable Energy Floor, SEF, y la baldosa Waynergy People, ofrecen una amplia información bibliográfica, por consiguiente, son seleccionada para realizar la valoración de generación de energía eléctrica, objeto de nuestro estudio.

### 3.9.1 Especificaciones y características Técnicas de los dispositivos piezoeléctricos.

Los dispositivos piezoeléctricos como fuentes de generación de energía eléctrica a través de la pisada humana, pueden identificarse según sus especificaciones y características técnicas de usos, en la Tabla 17, se consolidan los dispositivos piezoeléctricos disponibles en el mercado respecto al tipo de tecnología a utilizar en el presente Análisis Técnico y Económico.

La consecución del costo o el precio de las baldosas piezoeléctricas referenciadas, no viene siendo un ejercicio fácil de adquirir, ya que en la web la información al respecto no es precisa. Sin embargo, en entrevistas y conversaciones encontradas en documentos de internet los fabricantes o representantes de los productos Pavegen V3, Triangular, Sustainable Energy Floor, SEF, y Waynergy People, especifican un posible valor comercial el cual se señala en la Tabla 10, igualmente se ha utilizado para realizar el análisis económico del potencial de generación eléctrica a través de dispositivos piezoeléctricos.

**Tabla 10.** Especificaciones técnicas y costos de los dispositivos piezoeléctricos.

<b>Empresa</b>	<b>PAVEGEN</b>	<b>ENERGY FLOORS</b>	<b>Waynergy WAYDIP</b>
Producto	Baldosa Pavegen V3, Triangular	Suelos Sustainable Energy Floor, SEF	Baldosa Waynergy People
Medidas	50 [cm] por cada borde	50x50x8 [cm]	40x40 [cm]
Energía generada	Energía continúa de 5 Vatios a partir de cada paso, y tensión entre 12V y 48V (Pavegen, Technology V3, 2017)	Un paso en SEF generan entre 2 a 20 Joule, o producir de 7 hasta 30W por pisada (Energy Floors, 2016)	Genera 10 Vatios por paso, (WAYDIP, Waynergy, 2016)
Estimado de vida [años]	5 años equivalentes a unos 20 millones de pisadas	15	Desconocido

Costo comercial	£1000 (Libras Esterlinas) por metro cuadrado. (Pavegen, Technology V3, 2017)	Entre €500 y €1700 (euros) por baldosa. (Energy Floors, 2016)	€400 (Euros) por baldosa. (WAYD IP, Waynergy, 2016)
Costo en dólares	Costo Baldosa Pavegen, V3 Triangular por unidad, considerando que cada m <sup>2</sup> contiene 8 baldosas = \$136,96	Costo Baldosa Sustainable Energy Floor, considerando 500 Euros como el costo de una unidad de baldosa = \$501,98	Costo Baldosa Waynergy People, por unidad = \$401,58
Ventajas	Fácil Instalación. Adaptable a diferentes Ambientes. Uso interior y exterior. Amigable con el Medio Ambiente. Fabricadas en un 80% de materiales reciclados. Resistentes a la lluvia, nieve y hielo.	Uso interior y exterior. Para flujo peatones y tránsito vehicular. Pueden personalizarse. Las peatonales totalmente reciclable. El panel superior del piso puede ser un panel solar.	Aplicables en tránsito personal y movimiento de vehículos Aplicaciones de interior y exterior. Sustituyen el actual pavimento.
Desventajas	Costo elevado. Comercializadas por su fabricante. Dependen del flujo peatonal de personas para generar.	Costo elevado. Comercializadas por su fabricante. Depende el peso de la persona, el tipo de movimiento y la deflexión máxima para generar.	Costo elevado. Comercializadas por su fabricante. Dependen del peso del elemento que pasa sobre la baldosa, para generar.

### 3.10 Análisis de la tecnología de energía eléctrica mediante baldosas piezoelectricas disponibles en el mercado

#### 3.10.1 Análisis de la capacidad de Generación.

Dentro del marco del estudio, se consideró la posibilidad de adquirir un sistema de baldosas Power Floor, de la empresa Powerlead, en la tabla 11 detalla las características técnicas de la baldosa.

**Tabla 11.** Características de las baldosas piezoelectricas Power Floor.

Características	Valores
Dimensiones	0,50m x 0,50m x 0,085m
Desplazamiento	10mm
Voltaje de salida	48VDC
Resistente al agua	IP68
Vida útil estimada	10 años

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

Los costos de mantenimiento de sistema de baldosas piezoelectricas, detallados en la tabla 12, incluyendo la comprobación, y la limpieza de las baldosas, durante la vida útil de modulo piezoeléctrico.

**Tabla 12.** Costos de mantenimiento baldosas piezoeléctricas Power Floor.

Período de mantenimiento	Costo (USD)
Limpieza de impurezas y suciedad. Semestral	100
Limpieza de impurezas y suciedad. Anual	200
Costo Total (USD)	200

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

Los costos de implementación incluyen gastos en materiales, mano de obra, y, dirección técnica. La tabla 13, resumen los costos de implementación de un sistema de baldosas piezoelectricas.

**Tabla 13.** Costos de implementación baldosas piezoeléctricas Power Floor.

Implementación	Costo
Instalación (USD)	37.316
Mantenimiento (USD)	200
Inversión total (USD)	37.516

*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*

Se calculó la energía producida por la baldosa piezoeléctrica, en una hora, mediante la expresión.

$$E_p = (N)(P_i)(t)$$

En dónde,

$E_p$ , es la energía piezoeléctrica producida por la baldosa

$N$ , es el número de pisadas estimadas en un minuto

$P_i$ , es la potencia generada por pisada

$t$ , es el tiempo estimado de uso de baldosa en hora, (10 minutos)

$$E_p = (20) (5W) (0.167h)$$

$$E_p = 16.7 \text{ Wh}$$

Se calculó la energía producida por la baldosa piezoeléctrica, en un día, mediante la expresión.

$$E_{pd} = (E_p)(t)$$

En dónde,

$E_{pd}$ , es la energía piezoeléctrica producida por la baldosa en un día.

$E_p$ , es la energía piezoeléctrica producida por la baldosa

$t$ , es el tiempo estimado de uso de la cerámica al día, (100 minutos)

$$E_{pd} = (16.7) (1.67h)$$

$$E_p = 27.89W/día$$

Mediante la siguiente expresión, se determinó la energía producida en un mes.

$$E_{pm} = (E_p) (dl)$$

En dónde,

$E_{pm}$ , es la energía producida en mes

$E_p$ , es la energía piezoeléctrica producida por la baldosa

$dl$ , son los días del mes considerados laborables

$$E_{pm} = (27.89 \text{ W}) (20 \text{ días})$$

$$E_{pm} = 557.8 \text{ W/mes}$$

Se determinó la energía producida en un año. Como el sistema se va a integrar en el pasillo de la carrera de ingeniería en teleinformática, se consideró un año académico de 195 días.

$$E_{pa} = (E_p) (dl)$$

En dónde,

$E_{pa}$ , es la energía producida por la baldosa piezoeléctrica en un año

$dl$ , son los días laborables del año

$$E_{pa} = (557.8 \text{ W}) (195 \text{ días})$$

$$E_{pa} = 108.7 \text{ KW/año}$$

Se determinó la energía producida en el tiempo de vida útil de la baldosa piezoeléctrica mediante la siguiente expresión.

$$E_{pt} = (E_{pa}) (vu)$$

En dónde,

$E_{pt}$ , es la producción de energía eléctrica, considerando el tiempo de vida útil del sistema

$vu$ , es el tiempo de vida útil del sistema

$$E_{pt} = (108.7 \text{ KW}) (5 \text{ años})$$

$$E_{pt} = 543.85 \text{ KW}$$

Como se determina los valores que se genera por baldosa, ahora se debe analizar la energía generada en el pasillo de la carrera de ingeniería en teleinformática para obtener la energía necesaria para el sistema de iluminación de las 5 aulas que con este tipo de baldosas no es factible su implementación, además de tener un costo muy elevado.

Para efectos del análisis, se seleccionó baldosas piezoeléctricas de la empresa Powerleap, construidas en base a materiales reciclados. Cada baldosa tiene una geometría de 50cm x 50cm x 2cm, y, se mueve alrededor de 2 mm por debajo del pie al ser deformada. El kit básico ofertado, contiene una barra integrada LED para visualizar la energía aportada en cada pisada.

Para efectos de este estudio, se consideró que el área útil es el pasillo de la carrera de Ingeniería en Teleinformática de 10 m<sup>2</sup>. Por cuanto, cada baldosa cubre un área de 0,25 m<sup>2</sup>,

utilizando la expresión siguiente se determinó cuantas baldosas se requiere para capturar energía en toda el área útil.

$$N_b = \frac{Sc}{Sb}$$

En dónde,

$N_b$ , es el número de baldosas

$Sc$ , es la superficie a cubrir, m<sup>2</sup>

$Sb$ , es la superficie de la baldosa, m<sup>2</sup>

$$N_b = \frac{10}{0.25}$$

$$N_b = 40$$

Se determina que 40 baldosas son las empleadas para los 10 m<sup>2</sup>. De acuerdo al fabricante, cada paso genera 5 W de potencia, si 20 personas pisaran cada uno de las 40 baldosas.

$$E_p = (40) (5W) (0.167h)$$

$$E_p = 33.4 \text{ Wh}$$

Con este valor de potencia(W) generado en las 40 baldosas teniendo que durante la hora solo se acciona las baldosas por 10 minutos solo se genera 33.4 Wh lo cual no permita cargar las baterías para el consumo energético de la iluminación de las 5 aulas que son lámparas de 40 W cada una, por lo que se tiene como resultado que la implementación no abastece para el consumo energético.

### 3.10.2 Estimación de costo del sistema piezoeléctrico con Baldosas Power Floor.

**Tabla 14.** Costo del sistema piezoeléctrico con Baldosas Power Floor.

Equipo	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Baldosa Power Floor	40	501.98	20,079.2
Regulador	1	125	125
Inversor 6000 W	1	359	359
Batería	1	437.69	437.69
Total			21,000.89

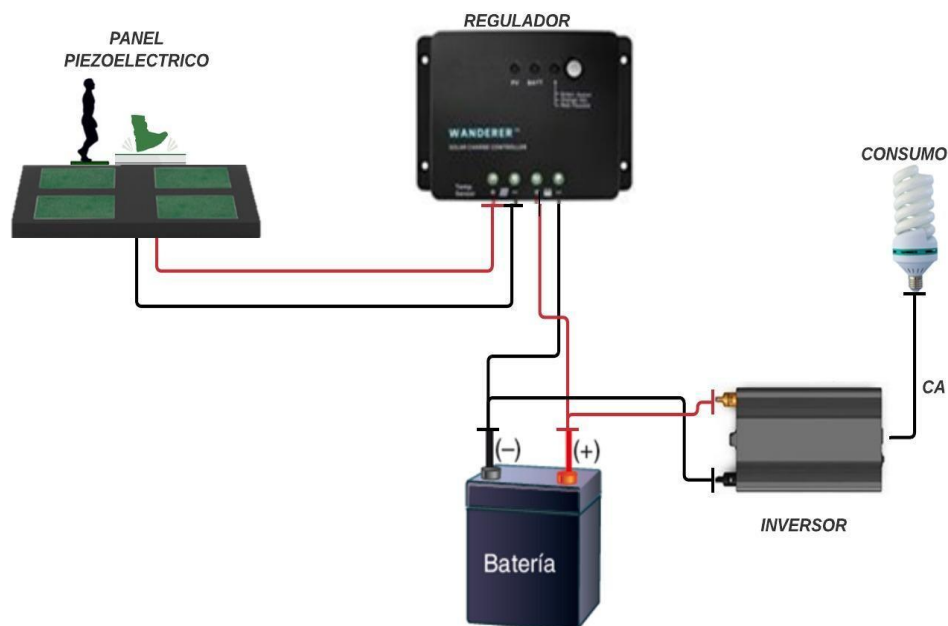
*Información tomada de investigación directa, 2020. Elaborado por el autor.*



El costo de instalación del Sistema Piezoeléctrico con baldosas está en los \$ 21,000.89 solo considerando los componentes más necesarios para su implementación, además los valores presentados son considerados en la fecha actual para el análisis, también no se contempla el costo por mantenimiento de los equipos dado su tiempo de vida útil, ni el costo por instalación de los equipos.

### 3.11 Diagrama de conexiones de un Sistema Piezoeléctrico

En el presente diagrama de la figura 28, se observa cómo se realizaría la instalación de un sistema generador de energía mediante celdas piezoelectricas. Donde tenemos la conexión de un regular. En teoría, el regulador o controlador de carga podría trabajar en dos zonas diferentes, en la zona de carga, siendo su misión garantizar la carga suficiente de la batería evitando sobrecargas, y en la zona de descarga, asegurando el suministro eléctrico diario suficiente y evitando descargas más allá de la profundidad de descarga de la batería. Una vez cargadas las baterías se conecta a un inversor el cual es el encargado la conversión de CC a CA y el regulador controla la carga de la batería y controlar las intensidades de la corriente. La corriente alterna obtenida por el inversor proporcionara la energía para utilización necesaria de la misma.



**Figura 21.** Sistema Piezoeléctrico, 2020. Información tomada de investigacion directa. Elaborado por el autor.

### 3.12 Conclusiones

- Mediante la evaluación de las implementaciones de sistemas piezoeléctricos a nivel mundial establecidos en el capítulo II se puede concluir, que esta energía renovable siendo factible para generar energía eléctrica, no abastece la demanda de energía requerida para el consumo en donde se implemente. Por motivos que aún se encuentra en vías de desarrollo y en una etapa de innovación.
- Según el estudio de los materiales piezoeléctricos presentados en la investigación en el capítulo II el más apto y con las mejores características es el PZT (Zircanato Titanato de Plomo), material cerámico con su módulo eléctrico de alto voltaje, domina el campo de los materiales piezoeléctricos en el diseño de la mayoría de dispositivos principalmente por sus aplicaciones en sensores y actuadores.
- Se concluye que la energía generada en el piso generador de energía eléctrica mediante celdas piezoelectricas, teniendo como resultado la potencia de 0.062 Wh durante del tiempo que actúan las baldosas, se determina que no abastece la generación de energía para el consumo del sistema de iluminación de las lámparas de las 5 aulas que se encuentra alrededor del pasillo del área de la carrera de Ingeniera Teleinformática de la facultad de ingeniería Industrial donde se realizó el estudio de implementación.
- El análisis de costo para instalación de generadores de energía eléctrica con materiales piezoeléctricos, considerando los 10 m<sup>2</sup> de espacio de implementación es de \$ 1671.69 y del sistema piezoeléctrico con baldosas piezoelectricas en el mismo espacio es de \$ 21,000.89 solo considerando los componentes más necesarios para su implementación. Se concluye que su costo si es elevado considerando el lugar determinado que se puso como medio útil. Se estableció de acuerdo con los indicadores económicos, que el sistema de baldosas piezoeléctricas propuesto es inviable económicamente, esto debido a la poca generación de energía que genera cada baldosa con relación a su costo de producción.

### 3.13 Recomendaciones

- Optimizar el sistema interno de la baldosa para la maximización energética y reducción del costo de producción por unidad, mejorando así la rentabilidad de la implementación.

- Se recomienda realizar un estudio en el cual se encuentre la zona más transitada de la universidad o en cualquier parte que se desee implementar el uso de las baldosas, de tal manera que se aproveche al máximo el uso de estas.
- Es recomendable, si se desea implementar en algún lugar con mayor tránsito, seleccionar el material de mejor calidad para poder producir la energía eléctrica que sea útil para un sistema de consumo de energía eléctrica del lugar.
- Cuando se desee implementar energías renovables, se debe tener en cuenta que se debe implementar una unidad de almacenamiento, ya que las energías renovables no pueden ser utilizadas directamente, deben poseer un sistema de almacenamiento de energía, en donde se almacené toda la energía generada para luego ser utilizada.

**ANEXOS**

## **Anexo 1**

### **Artículos Investigativos**



#### **Sección séptima**

#### **Biosfera, ecología urbana y energías alternativas**

**Art. 413.-** El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

**Art. 414.-** El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo.

*Información tomada de la Constitución de la República del Ecuador.*



**REGISTRO OFICIAL**  
ÓRGANO DEL GOBIERNO DEL ECUADOR  
Administración del Sr. Ec. Rafael Correa Delgado  
Presidente Constitucional de la República

**TERCER SUPLEMENTO**

Año II - Nº 418

Quito, viernes 16 de  
enero de 2015

Valor: US\$ 1.25 + IVA



**ASAMBLEA NACIONAL**  
REPÚBLICA DEL ECUADOR

**ING. HUGO DEL POZO BARREZUETA**  
DIRECTOR

Quito: Avenida 12 de Octubre  
Nº 23-99 y Wilson

Edificio 12 de Octubre  
Segundo Piso

Dirección: Telf. 2901 - 629

Oficinas centrales y ventas:

Telf. 2234 - 540

3941 - 800 Ext. 2301

Distribución (Almacén):

Mañosa Nº 201 y Av. 10 de Agosto

Telf. 2430 - 110

Sucursal Guayaquil:

Malecón Nº 1606 y Av. 10 de Agosto

Telf. 2527 - 107

Suscripción semestral: US\$ 200 + IVA

para la ciudad de Quito

US\$ 225 + IVA para el resto del país

Impreso en Editora Nacional

28 páginas

[www.registrooficial.gob.ec](http://www.registrooficial.gob.ec)

Al servicio del país

desde el 1º de julio de 1895

**LEY ORGÁNICA  
DEL SERVICIO  
PÚBLICO DE  
ENERGÍA  
ELÉCTRICA**

**Título IV**

**GESTIÓN DE FUENTES ENERGÉTICAS  
Y ENERGÍAS RENOVABLES NO  
CONVENCIONALES**

**Artículo 26.- Energías renovables no convencionales.-**

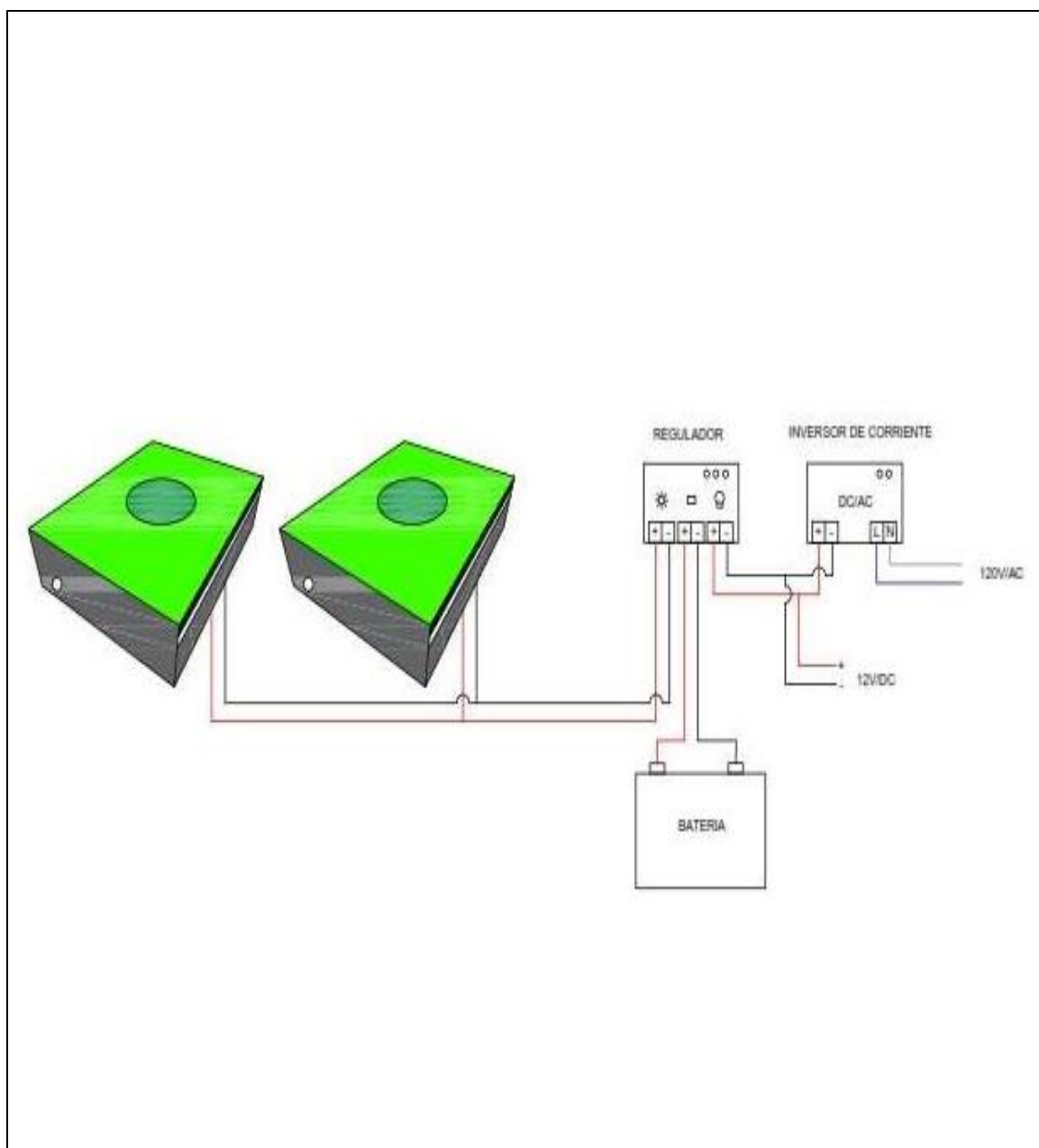
El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable promoverá el uso de tecnologías limpias y energías alternativas, de conformidad con lo señalado en la Constitución que propone desarrollar un sistema eléctrico sostenible, sustentado en el aprovechamiento de los recursos renovables de energía.

La electricidad producida con este tipo de energías contará con condiciones preferentes establecidas mediante regulación expedida por el ARCONEL.

*Información tomada del manual de la Ley Orgánica del servicio público de energía eléctrica.*

## Anexo 2

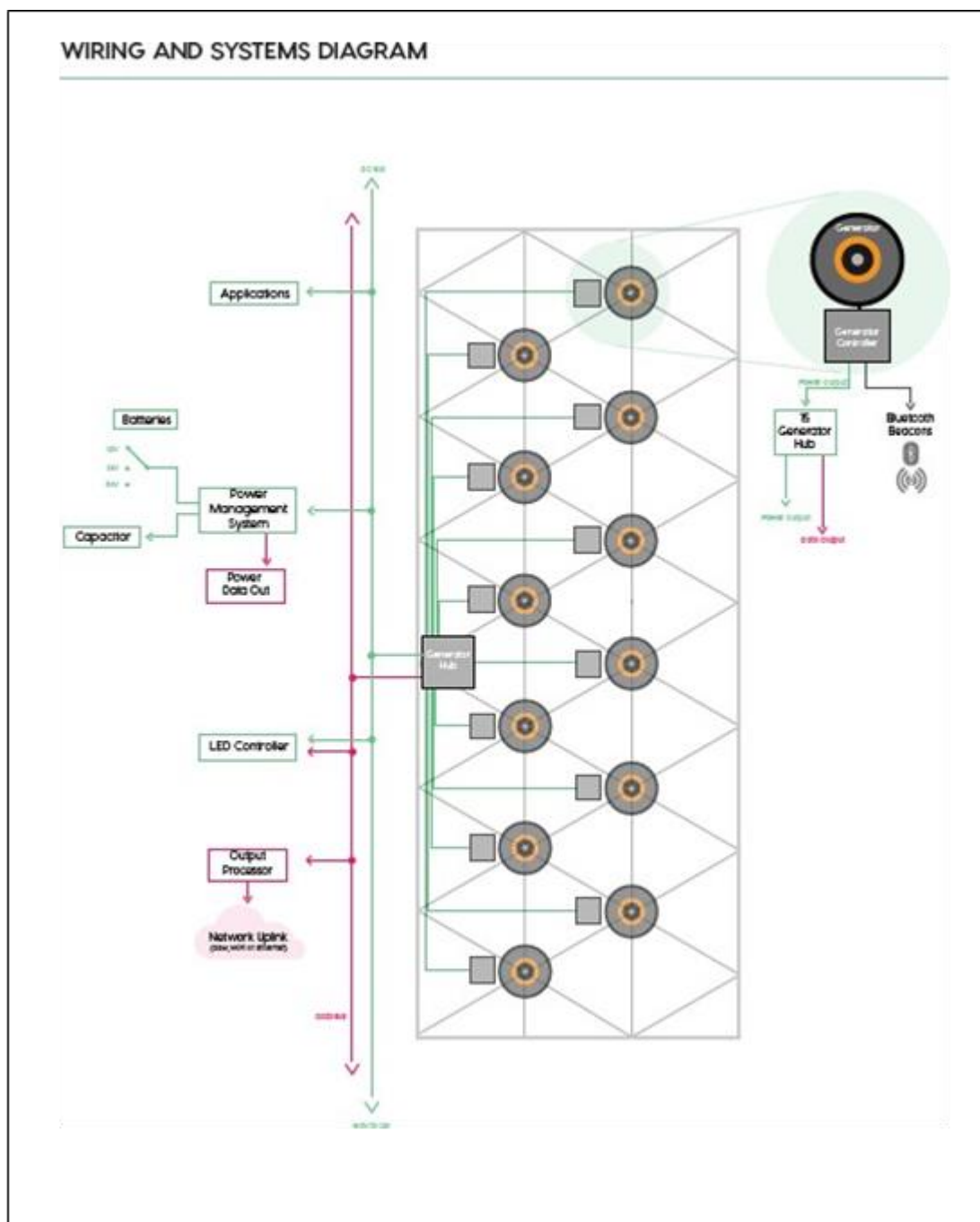
### Diagrama de Sistema Piezoeléctrico



*Información tomada de diagramas piezoeléctricos .com*

### Anexo 3

#### Diagrama sistemático de baldosa



Información tomada de System Diagram .com



## Bibliografía

- Acosta, J. (23 de febrero de 2010). *Ecuared*. Obtenido de [https://www.ecured.cu/Diodo\\_1N4005](https://www.ecured.cu/Diodo_1N4005)
- Bertomeu, P. (Abril de 2010). *Diposit*. Obtenido de Diposit:  
<http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/99003/1/entrevista%20pf.pdf>
- Borja, L. (28 de Diciembre de 2008). *TUEXPERTO*. Obtenido de  
<https://www.tuexperto.com/2008/12/28/en-el-metro-de-tokyo-los-viajeros-generan-electricidad-con-sus-pisadas/>
- Briones, T. (2014). *Energías Renovables*. Obtenido de  
<https://es.scribd.com/document/378223035/ENERGIAS-RENOVABLES>
- Catellano, N. (2013). Evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico. En N. Catellano. *Inventum*.
- CENIDET. (2015). *Transformadores Piezoeléctricos: Una alternativa para implementar balastos electrónicos compactos*. Obtenido de <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/t>
- Chevez, B. (29 de Diciembre de 2014). *Blogs Pot*. Obtenido de  
<https://electricidadymagnetismo01.blogspot.com/2014/12/unidad-1.html>
- Colmera, A., & Castro, M. (2017). *Servicios Educativos Comerciales Virtuales para Ingenieros y Tecnicos Latinoamericanos SECVITEL*. Obtenido de  
[http://secvitel.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=58:breve-historia-del-uso-mundial-de-energia&catid=47:articulos&Itemid=58](http://secvitel.com/index.php?option=com_content&view=article&id=58:breve-historia-del-uso-mundial-de-energia&catid=47:articulos&Itemid=58)
- CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR. (2008). *JURIDICO*. Obtenido de  
[https://www.oas.org/juridico/mla/sp/ecu/sp\\_ecu-int-text-const.pdf](https://www.oas.org/juridico/mla/sp/ecu/sp_ecu-int-text-const.pdf)
- Fischer, W. (1987). *The human Gait*. Berlin: Heidelberg.
- Fresneda, C. (5 de Mayo de 2013). *Las Baldosas inteligentes que Generan Electricidad*. Obtenido de <https://www.elmundo.es/elmundo/2013/05/23/natural/1369334180.html>
- Fuentes, A. (2015). *Modelo lineal de un transductor ultrasonico de potencia utilizando circuitos equivalentes*. Obtenido de  
[http://fisica.usach.cl/sites/fisica/files/tesis\\_alejandro\\_fuentes.pdf](http://fisica.usach.cl/sites/fisica/files/tesis_alejandro_fuentes.pdf)
- Gatto. (2011). Obtenido de  
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9475/Tesis.pdf?sequence=1>
- Gomez, A. (18 de Junio de 2017). *Ebuah.uah.es*. Obtenido de  
[https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG\\_Gomez\\_Molina\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Greiffenstein, R. (2015). *¿Cómo generar energía renovable con solo caminar?*. Obtenido de <http://vidamasverde.com/2014/cmo-generar-energa-renovable-con-solo-caminar/>
- Henriquez, P. (2015). *Regulador de panel solar-bateria-carga Micricontrolador PIC*. Obtenido de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1383/IME\\_076.pdf?sequence=1](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1383/IME_076.pdf?sequence=1)
- Hernandez, O. (2016). *Sintesis y caracterizacion de ceramicos piezoelectricos base titanatos alcalinos de bismuto*. Obtenido de <http://tesis.bnct.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/9542/18.pdf?sequence=1>
- Howells. (2009). Obtenido de [http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/8763/Factibilidad\\_tecnica\\_economica.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/8763/Factibilidad_tecnica_economica.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- ICONO. (abril de 2010). *Boletín VT*. Obtenido de [https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt\\_mat\\_n3.pdf](https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt_mat_n3.pdf)
- IDAE. (Agosto de 2012). *ENERGIAS RENOVABLES*. Obtenido de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/energia-hidroelectrica>
- Inova, M. (2002). *FENERCOM*. Obtenido de <https://www.fenercom.com/pdf/aula/recorrido-de-la-energia-la-electricidad.pdf>
- Korla, Leon, Tansel, & Yenilmez. (2011).
- Ley Organica del Servicio Publico de Energia Electrica. (2015). Obtenido de [http://www.cenace.org.ec/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=25:lospee&Itemid=1](http://www.cenace.org.ec/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=25:lospee&Itemid=1)
- Mata, A. (2014). *Innovacion Educativa*. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=nXuqCQAAQBAJ&pg=PA1708&dq=baldosa+piezoelectrica&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjp1M6iqMHcAhVQmeAKHYhfCfEQ6AEIjAA#v=onepage&q=baldosa%20piezoelectrica&f=false>
- Molina, A. (Junio de 2018). *eebauh.uah.es*. Obtenido de [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG\\_Gomez\\_Molina\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Montes, J. (Julio de 2012). *Instalaciones electricas*. Obtenido de <https://www.krostec.com/#!instalaciones-electricas/c1yox>
- Moreno, J. (2016). *Ceramica y Vidrio*. Obtenido de Aplicacion de sensores piezoelectricos ceramicos a la caracterizacion biomecanica:

- [https://www.researchgate.net/publication/39395020\\_Aplicacion\\_de\\_sensores\\_piezoelctricos\\_ceramicos\\_a\\_la\\_caracterizacion\\_biomecanica](https://www.researchgate.net/publication/39395020_Aplicacion_de_sensores_piezoelctricos_ceramicos_a_la_caracterizacion_biomecanica)
- Orza, A. (2010). *edu.xunta*. Obtenido de <http://www.edu.xunta.gal/centros/cpiontonioorzacouto/system/files/TEMA%20%20LA%20ELECTRICIDAD%20I.pdf>
- Paladines, J. (9 de marzo de 2018). *evwind.com*. Obtenido de Energía Eólica: <https://www.evwind.com/2019/03/28/energia-eolica-de-la-guajira-para-colombia/>
- Pavegen, L. (2016). *Pavegen Introducing our future*. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/future-pavegen-here-introducing-our-v3-laurence-kemball-cook>
- Ronsabay, J. (2014). *Gimnasia Cerebral*. Obtenido de <http://tugimnasiacerebral.com/herramientas-de-estudio/que-es-una-encuesta-caracteristicas-y-como-hacerlas>
- Roundy, S. (2016). *A study of low level vibrations as a source for wireless sensor nodes*. Obtenido de <http://iss.mech.utah.edu/files/2012/10/ComputerCommunications-Roundy-2003.pdf>
- Siles, E. (2017). *Simulación de estructuras mecánicas para UAVS*. Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/16028/4/memoria.pdf>
- Sodano, H. (2015). *Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries*. Obtenido de <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1045389X05056681>
- Sodano, H. (2017). Obtenido de <http://www.me.mtu.edu/~hsodano/Publications/MSSP%202003%20MFC%20Ap>
- Starner, T. (2003). *Low power Electronics Design, Capítulo: Human Generated Power for Mobile Electronics*. CRC PRESS.
- Tamayo, A., & Cardozo, N. (2017). *Universidad Católica de Colombia*. Obtenido de Tesis de Grado: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14488/1/Proyecto%20de%20grado%20piezoelctricos%20en%20perfil%20vial%20piloto%20en%20Bogot%C3%A1.pdf>
- Twenergy. (2019). *Twenergy*. Obtenido de <https://twenergy.com/energia/energia-solar>
- Volt, D. (2016). *Energías Renovables-Baterías para almacenar*. Obtenido de <http://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>
- Zapata, L. (Abril de 2017). *PROPIEDADES DEL GRAFENO*.