

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL GENERADOR DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE UNA BALDOSA CON ELEMENTOS  
PIEZOELÉCTRICOS

JONATHAN FERNANDO BURBANO BARAHONA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BOGOTÁ D.C  
2021

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL GENERADOR DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE UNA BALDOSA CON ELEMENTOS  
PIEZOELÉCTRICOS

JONATHAN FERNANDO BURBANO BARAHONA 701764

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico y de  
Telecomunicaciones

Director  
MSc. José León León

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BOGOTÁ D.C  
2021

## Esquema de Licencia Creative Commons



### Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia.](#)

#### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

**Adaptar** — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

---

#### Bajo los siguientes términos:

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo de grado está dedicado primero que todo a Dios, quien me ha dado la sabiduría para sacar adelante este proyecto, agradezco infinitamente a mi amada esposa, quien es mi motor, quien ha estado en las buenas y en las malas, quien me ha apoyado en cada paso que he dado y me motiva todos los días para ser alguien mejor y alcanzar mis metas.

A mi familia, mis padres y hermanas que han hecho de mi un hombre de bien, por estar siempre presente y por todo el apoyo que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

Agradezco a todos los docentes de la Universidad Católica de Colombia, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión, de manera especial, al ingeniero José León tutor de mi proyecto de investigación quien me ha orientado de la mejor manera para sacar adelante este gran logro.

A todas las personas que nos han apoyado durante este grandioso proceso ingeniero José Cuarán y han hecho que este trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

El autor

## TABLA DE CONTENIDO

### Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	12
2	GENERALIDADES .....	15
2.1	ANTECEDENTES.....	15
2.1.1	Estudios Realizados Y Aplicaciones .....	15
2.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
2.3	OBJETIVOS.....	27
2.3.1	Objetivo General .....	27
2.3.2	Objetivos Específicos .....	27
2.4	JUSTIFICACIÓN.....	28
2.5	DELIMITACIÓN .....	30
2.5.1	Delimitación Espacial .....	30
2.5.2	Delimitación Temporal.....	31
2.5.3	Delimitación del Contenido.....	31
2.6	MARCO REFERENCIAL.....	31
2.6.1	MARCO TEORICO.....	31
2.6.2	MARCO CONCEPTUAL .....	42
2.6.2.1	Energías Limpias.....	42
2.7	METODOLOGIA .....	56
2.8	ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	57
2.9	DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	59
2.9.1	Selección Del Sensor Piezoeléctrico.....	60
2.9.2	Selección Del Rectificador De Onda Completa.....	62
2.9.3	Selección De Los Condensadores .....	62
2.9.4	Diodos .....	62
2.9.5	Selección Del Material De La Caja Tipo Baldosa .....	64
2.9.6	Resortes.....	64

3	DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	65
4	PRUEBAS Y VALIDACION DE RESULTADOS .....	70
4.1	Patrón para la toma de datos de la prueba .....	75
4.2	Circuito serie con resistencia de $33k\Omega$ .....	76
4.3	Circuito paralelo con resistencia de $33 K\Omega$ .....	78
4.4	Circuito mixto con resistencia de $33k\Omega$ .....	79
5	DESCRPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO .....	87
6	CONCLUSIONES .....	88
7	TRABAJOS FUTUROS.....	90
8	BIBLIOAGRAFIA .....	91
9	ANEXOS.....	98

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Características del diseño de diferentes geométricas de material piezoeléctrico .....	16
Figura 2. baldosa diseñada por los estudiantes.....	18
Figura 3. Imagen de una baldosa de la compañía Pavegen.....	24
Figura 4. Sección interna de un condensador.....	36
Figura 5. Grafica de carga de un condensador con respecto al tiempo.....	38
Figura 6. Descarga de un condensador con respecto al tiempo.....	39
Figura 7. Diodo y sus terminales.....	40
Figura 8. Circuito rectificador de onda completa.....	40
Figura 9. Onda senoidal modificada por el rectificador de onda completa.....	41
Figura 10. Piezoeléctrico tipo pila .....	44
Figura 11. Piezoeléctrico nanoposicionador flexure.....	44
Figura 12. Combinación de un piezoeléctrico y un tornillo motorizado .....	45
Figura 13. Efecto piezoeléctrico directo. ....	46
Figura 14. Efecto piezoeléctrico indirecto. ....	47
Figura 15. Estructura Cristalina del Cuarzo .....	48
Figura 16. Sal de Rochelle.....	49
Figura 17. Estructura Ciclosilicatos.....	50
Figura 18. Topacio .....	50
Figura 19. Potencia eléctrica .....	54
Figura 20. Diagrama del sensor piezoeléctrico con la carga .....	54
Figura 21. Diagrama de bloques de la metodología propuesta. ....	56
Figura 22. Sensor piezoeléctrico convencional.....	60
Figura 23. Sensor piezoeléctrico usado en el proyecto .....	61
Figura 24. Resorte Cilíndrico .....	64
Figura 25. Conexión de los piezoeléctricos .....	65
Figura 26. Ubicación de los sensores piezoeléctricos conectados en serie. ....	66
Figura 27. Conexión de los sensores piezoeléctricos en paralelo. ....	67
Figura 28. circuito de conexión mixta.....	67
Figura 29. Rectificador de onda completa .....	68
Figura 30. Condensador instalado en el circuito eléctrico.....	69
Figura 31. Ubicación de los resortes de compresión. ....	70
Figura 32. Elaboración de la caja para la baldosa piezoeléctrica .....	70
Figura 33. Construcción de la caja tipo baldosa .....	71
Figura 34. Resultado de la caja tipo baldosa .....	72
Figura 35. Pestañas de la caja de la baldosa piezoeléctrica. ....	73
Figura 36. Pestañas de la tapa de la caja de la baldosa piezoeléctrica.....	74



Figura 37. Voltaje para el circuito serie con resistencia de $33K\Omega$ .....	76
Figura 38. Potencia generada por el circuito serie con resistencia $33K\Omega$ .....	77
Figura 39. Voltajes obtenidos por el circuito paralelo con resistencia de $33K\Omega$ ....	78
Figura 40. Potencia generada por el circuito paralelo con resistencia de $33K\Omega$ ...	78
Figura 41. Voltajes obtenidos por el circuito mixto con resistencia de $33K\Omega$ .....	80
Figura 42. Potencia generada por el circuito mixto con resistencia de $33K\Omega$ .....	80
Figura 43. Potencias promedio generadas por las conexiones .....	83
Figura 44. Figura del circuito final para el prototipo .....	84
Figura 45. Voltajes obtenidos por lo piezoeléctricas en la conexión final .....	85
Figura 46. Potencia generada por el circuito en paralelo .....	85

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Constantes piezoeléctricas. ....	35
Tabla 2. Análisis de antecedentes referenciados.....	57
Tabla 3. Análisis de diodos para usar .....	62
Tabla 4. Valores de potencia promedio de las configuraciones establecidas .....	82
Tabla 5. Descripción económica del proyecto. ....	87

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Código usado en Matlab .....	98
Anexo 2. Código de Matlab para la gráfica de todas las potencias generadas.....	98
Anexo 3. Código usado en Arduino .....	99

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha evidenciado un incremento significativo en la temperatura ambiental según la organización meteorológica mundial (OMM), ha ocasionado anomalías como el aumento del nivel del mar, aparición de fenómenos meteorológicos extremos, la concentración de gases de efecto invernadero. Todo esto proyecta un gran incremento en las temperaturas del ambiente en el futuro por lo tanto las condiciones antes mencionadas podrían empeorar. Por ello es importante empezar a pensar alternativas que permitan mitigar estos factores críticos para el medio ambiente.<sup>1</sup>

La humanidad está evidenciando cómo ha cambiado la calidad del aire, las temperaturas cada vez son más altas y los incendios forestales son cada vez más frecuentes. En el mundo es muy común el uso de centrales termoeléctricas para la producción de energía eléctrica<sup>2</sup>, para ello se requiere combustibles fósiles como fueloil, gas natural o carbón, estos combustibles son algunos de los que más contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero. Los combustibles fósiles son muy utilizados en las potencias mundiales para el desarrollo industrial, esto según un reportaje de la BBC<sup>3</sup>. Por esta razón el mundo está cada vez más interesado en encontrar soluciones que se enfocan en las energías limpias.

La comunidad científica y las grandes empresas se han motivado para el desarrollo de sistemas autosuficientes, eficaces y que no generen ningún tipo de contaminación al medio ambiente<sup>4</sup>, o de estos sistemas que ha tomado más fuerza

---

<sup>1</sup> (*El Clima Mundial: Entre 2015 y 2019 Se Ha Acelerado El Cambio Climático | Organización Meteorológica Mundial*, n.d.) [sitio web] [consulta 25 de enero 2021] disponible en <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-clima-mundial-entre-2015-y-2019-se-ha-acelerado-el-cambio-clim%C3%A1tico>.

<sup>2</sup> INSTITUTO CATALAN DE ENERGIA. Centrales térmicas convencionales Bogotá. Generalitat de Catalunya. [sitio web] [consulta 24 de marzo del 2021]. Disponible en [http://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/centrals\\_convencionals/](http://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/centrals_convencionals/)

<sup>3</sup> (Cambio climático: los gráficos animados que muestran los 15 países que más CO2 emitieron en los últimos 20 años – BBC News | Mundo) [sitio web] [ consulta 25 de enero 2021] disponible en <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-50811389>

<sup>4</sup> SUPPORT&TRAINING FOR AN EXCELLENT ENERGY EFFICIENCY PERFORMANCE. Eficiencia energética [sitio web] [consultado el 24 de marzo del 2021] disponible en [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_15/recursos/01\\_general/09062014/n\\_icontec.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_15/recursos/01_general/09062014/n_icontec.pdf)

son los piezoeléctricos que mediante energía mecánica producen energía eléctrica, esto gracias a su composición química.

En el planeta tierra existen varios tipos de piezoeléctricos como son el cuarzo, el rubidio, sal de Rochelle y cerámicos entre otros. Para el prototipo funcional tipo baldosa se utilizó piezoeléctricos que son a base de cuarzo, básicamente la generación de energía eléctrica consta de la deformación física que sufre esta piedra y gracias a la composición química interna se produce la energía eléctrica, este mineral se instalará en un prototipo tipo baldosa que, al ser pisada por personas al momento de caminar, esta producirá energía eléctrica la cual podrá ser almacenada para la alimentación de cualquier servicio eléctrico y este tipo de energía es llamada energía limpia. El prototipo tipo baldosa podrá ser instalado en cualquier lugar, pero para mayor eficiencia se recomienda que sea instalado en grandes superficies como metros, centros comerciales, aeropuertos, estadios de fútbol entre otros, donde la afluencia de personas sea en grandes cantidades.

El desarrollo de este prototipo consta de varias fases, la primera se basó en la búsqueda de la información de los elementos piezoeléctricos, cómo son usados y sus beneficios en la generación de energía eléctrica, en la segunda fase se realizó la formulación y planteamiento del problema, donde se analizó una problemática existente, y se buscó contribuir con nuevas alternativas de producción de energías limpias con el uso del prototipo tipo baldosa, en la fase tres se realizó el diseño de este prototipo, se seleccionó los elementos que se utilizaron para el circuito, en la fase cuatro se realizó la implementación del diseño y la validación de resultados, donde se realizó las mediciones correspondientes para hallar el voltaje producido, con estos datos se obtuvo la potencia generada.

Para este proyecto se hicieron mediciones con diferentes tipos de conexiones para indagar sobre qué tipo de conexión podría brindar una mayor cantidad de voltaje y a su vez generar niveles elevados de potencia, para esto se hicieron montajes de circuitos de los piezoeléctricos en serie, en paralelo y una conexión Mixta, lo que indica dos piezoeléctricos en serie y dos piezoeléctricos en paralelo.

## Glosario

- **Energías renovables:** se denomina energía renovable a la energía que se obtiene a partir de fuentes naturales inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.
- **Permitividad:** está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material.
- **Compliancia:** es una tasación de la propiedad de un órgano hueco que le permite el alargamiento o distensión en resistencia al retorno hacia sus dimensiones originales.
- **Autosostenible:** Que es capaz de sostenerse por sí mismo.

## GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de dispositivos que faciliten la producción de energía eléctrica, posibilitando a la humanidad tener interés a la generación de energías limpias, la baldosa generadora de energía eléctrica transforma la energía mecánica a energía eléctrica en tiempo real.

La utilización de sensores piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica y el movimiento que realiza el ser humano cuando camina, esta unión permite la generación de energía eléctrica, de esta manera se reduce de cierta manera el consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad.

A continuación, se presentan algunos de dispositivos comerciales, estudios científicos y uso de técnicas de generación de electricidad utilizando sensores piezoeléctricos.

#### 1.1.1 Estudios Realizados Y Aplicaciones

Los autores Borda y Mendoza<sup>5</sup> presentan el modelo matemático de un generador piezoeléctrico, ellos hacen un estudio matemático sobre el comportamiento de un generador piezoeléctrico usando movimientos mecánicos para generar electricidad, con el fin de implementar una metodología que permita realizar simulaciones teniendo como base la estructura del modelo, para este estudio los autores proponen un sistema mecánico masa-resorte-amortiguador. Con el objetivo de hacer un análisis al comportamiento del piezoeléctrico ante una fuerza mecánica de entrada.

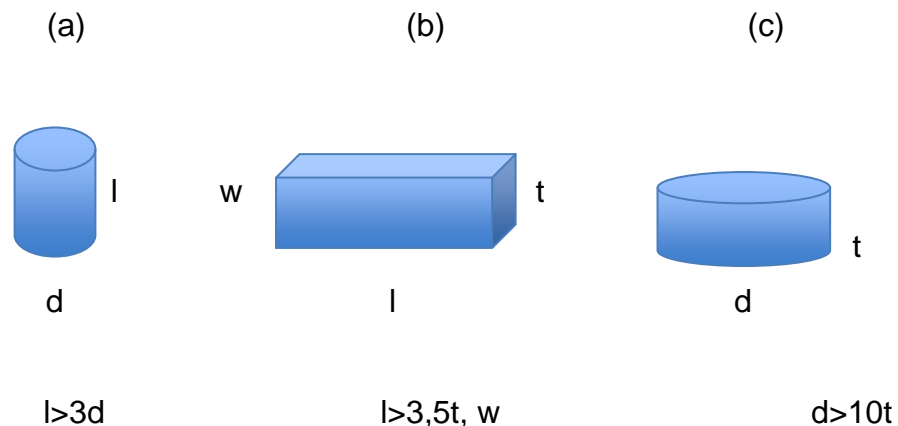
---

<sup>5</sup> BORDA, Oscar Javier y MENDOZA, Laura Carolina. Modelo matemático generador piezoeléctrico – Trabajo de grado Bogotá DC: Universidad Santo Tomas Facultad de Ingeniería Electrónica [ sitio web] [ consultado 25 de enero del 2021] disponible en <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16789/2019oscarborda.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Los autores García, Gélvez y Torres<sup>6</sup> realizan el análisis del Diseño de transductor piezoeléctrico para generación de potencia eléctrica, donde hacen un estudio sobre la manera de usar un generador piezoeléctrico teniendo en cuenta características como voltaje y potencia para la generación de electricidad, también analizan los parámetros en la geometría del cristal para tener una obtención más eficiente de energía eléctrica.

Para esta se validaron las dimensiones del área y la relación que tiene con el espesor, dependiendo el material que va a ser utilizado, teniendo en cuenta lo eficiente que puede ser cuando es expuesto a movimientos mecánicos para la obtención de energía eléctrica. Los autores hacen una comparación de las formas geométricas, usando piezoeléctricos como lo muestra la Figura 2, donde la imagen (2a) indica el uso de un sistema piezoeléctrico en forma de varilla de poste, para la imagen (2b) se muestra una placa plana y delgada, y la imagen (2c) muestra la forma geométrica de un disco plano y delgado<sup>7</sup>.

Figura 1. Características del diseño de diferentes geométricas de material piezoeléctrico



Fuente: Diseño de transductor piezoeléctrico para generación de potencia eléctrica<sup>8</sup>.

<sup>6</sup> FORERO GARCÍA, Edwin F; GÉLVEZ LIZARAZO, Óscar M; TORRES PINZON, Carlos A "Piezoelectric transducer design for electric power generation". revista UIS ingenierías. 2019, vol.18, nro. 1. ISSN Online: 2145 - 8456 P. 119

<sup>7</sup> *Ibíd.*, P. 120

<sup>8</sup> Diseño de transductor piezoeléctrico para generación de potencia eléctrica. [online] [consultado 25 de enero del 2021]. disponible en [https://pdfs.semanticscholar.org/c5aa/6bb2d92fcac3f8a1514295c2679b3fad0cd8.pdf?\\_ga=2.241363012.798345852.1601943787-261638499.1601943787](https://pdfs.semanticscholar.org/c5aa/6bb2d92fcac3f8a1514295c2679b3fad0cd8.pdf?_ga=2.241363012.798345852.1601943787-261638499.1601943787)



La conclusión de este estudio menciona, que la forma geométrica cilíndrica es más eficiente en el momento de la transformación de energía mecánica a energía eléctrica, ya que genera un 99,53% más de efectividad con respecto a la geometría plana y delgada.<sup>9</sup>

En la tesis presentada por Jiménez<sup>10</sup> a la Universidad Distrital de Colombia, análisis del estado actual de la tecnología de Recolectores de energía basados en piezoelectricidad, donde hace una investigación de las maneras más utilizadas en la actualidad para transformar la energía presente en el medio ambiente a energía eléctrica donde analizo los materiales y técnicas más usadas. Para ello se tuvo en cuenta la energía cinética usando elementos piezoeléctricos, con las teorías existentes, enfoques, diseños y puntos de vista. su objetivo fue analizar y validar cada uno de los procesos de producción de energías eléctricas que no afecte el entorno donde se encuentra.

En la escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica los estudiantes Adriana Hernandez, Erick Perez<sup>11</sup> y Antonio Pineda, en su tesis de grado titulada propuesta de diseño de un piso generador de energía eléctrica, hacen un estudio de los piezoeléctricos, analizan el peso promedio de las personas, para identificar con que tanta fuerza el ser humano apoya el peso de en un solo pie cuando está caminando, con esta información la propuesta de describe en hacer la conexión de los piezoeléctricos en serie, los autores hallaron los valores de corriente y potencia promedio e hicieron un cálculo de cuanto se beneficiario la empresa o persona que se interese por esta tecnología, y a su vez contribuye a la conservación medio ambiente. En la figura 2 se muestra la imagen de la baldosa creada por los estudiantes.

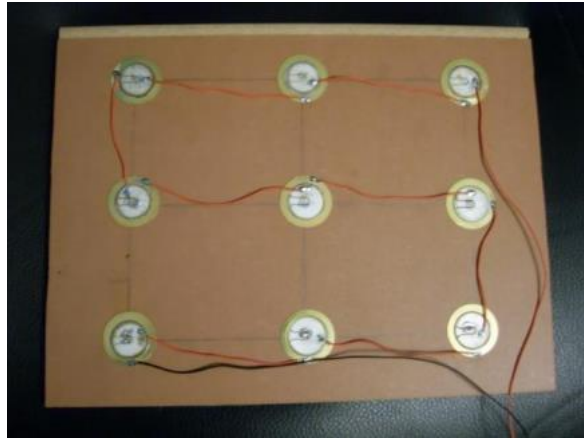
---

<sup>9</sup> *Ibíd.*, P. 120

<sup>10</sup> RUBIO JIMÉNEZ, Fredy Alexander. Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting Recolectores de energía basados en piezoelectricidad. Trabajo de grado. Bogotá DC. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad tecnológica- Tecnología en electricidad [sitio web] [consultado 25 de enero del 2021]. Disponible en <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13444/JimenezRubioFredyAlexander2018.pdf;jsessionid=554A5A2910B4D0EA46A5F81D1BA27677?sequence=1>

<sup>11</sup> CORTÉS HERNÁNDEZ Adriana, ENSAZTIGA Erick Manuel, PINEDA FLOREZ Marco Antonio. Propuesta de diseño de un piso generador de energía eléctrica. Trabajo de grado México. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica [ sitio web] [consultado el 16 de mayo del 2021]. disponible en [https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18605/TESIS\\_PISO\\_GENERADOR.pdf?sequence=1&isAllo wed=y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18605/TESIS_PISO_GENERADOR.pdf?sequence=1&isAllo wed=y)

Figura 2. baldosa diseñada por los estudiantes



Fuente: Propuesta de diseño de un piso generador de energía eléctrica<sup>12</sup>

Los autores Arizaga y González<sup>13</sup> hacen un estudio de movilidad y piezoelectricidad, analizando la línea dos del tren eléctrico de Guadalajara, México donde hacen el cálculo de los tiempos de hora pico para ingresar al servicio, contabilizando el número de personas por vagón, analizando el peso promedio tanto de mujer como hombre de la ciudad de Guadalajara, México, los autores realizan este análisis para identificar el nivel de consumo que requiere esta línea de tren para la prestación del servicio, teniendo esta información validar el uso de elementos piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica y se comparó que servicios se podrían alimentar con esta producción, con esto se concluyó que es viable tomar como punto a favor la problemática que se vive en tiempos de mayor afluencia de pasajeros y el uso de elementos piezoeléctricos para producir electricidad que podría ser inyectada a las líneas de tren directamente para su uso inmediato y así disminuir los costos de operación y contribuir con el medio ambiente.

Los estudiantes Andrés Jaramillo, Meyker López y Kelly Muñoz<sup>14</sup>, hacen un estudio titulado Diseño de un prototipo de baldosas inteligentes de alto tráfico para implementación en el sistema de transporte público Transmilenio de la ciudad de Bogotá, analizan el uso de una baldosa con elementos piezoeléctricos para la

<sup>12</sup> Propuesta de diseño de un piso generador de energía eléctrica, op. Cit., p. 24

<sup>13</sup> ARIZAGA BARRAGÁN, Arturo; GONZÁLEZ PÉREZ, Mario Guadalupe. Movilidad y piezoelectricidad: un estudio de la línea 2 del tren eléctrico de Guadalajara, México. Redes de ingeniería. 2018. Vol. 9, nro. 2. ISSN: 2248-762X. P. 51

<sup>14</sup> JARAMILLO Andrés Felipe LÓPEZ Mayker Guillermo MUÑOZ Kelly Johana diseño de un prototipo de baldosas inteligentes de alto tráfico para implementación en el sistema de transporte público Transmilenio de la ciudad de Bogotá. Bogotá D.C. Universidad Piloto de Colombia. 2018. P. 115

generación de energía eléctrica, la energía es generada por el caminar de los usuarios del sistema, los estudiantes analizaron específicamente la estación de Transmilenio de san mateo, en Bogotá, para esto los autores deciden hacer pruebas de conexiones de los sensores piezoeléctricos en serie y en paralelo para identificar cuál de estas configuraciones es más conveniente a la generación de energía eléctrica, adicionalmente hicieron pruebas variando el tipo de los condensadores, usando condensadores electroestáticas y de cerámica, teniendo esta información los autores concluyen que la configuración más conveniente para la generación de energía eléctricas es la conexión en paralelo, así mismo identificador el condensador que más conviene a la conexión del circuito es el condensador electrolítico.

En el estudio, los autores Jiménez y De Frutos<sup>15</sup> analizan la optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de recolección de energía, donde hacen una comparación de dos sistemas de generación de energía eléctrica usando elementos piezoeléctricos para determinar cuál es más eficiente, el estudio se divide en dos escenarios iniciales, uno es un montaje que simula el paso de vehículos tipo berlina a una velocidad aproximada de 62 *km/h* por encima de los elementos piezoeléctricos, los cuales generan un impacto al elemento y produce la energía eléctrica, el funcionamiento de este montaje produce una vibración aproximada de 14 *Hz* que para los autores del estudio se podría aprovechar instalando el segundo escenario, el cual es colocar un elemento piezoeléctrico para generar energía eléctrica, en este punto se evidencio que el escenario más eficiente es el primero, electricidad producida por impactos, pero los autores fueron un poco más allá, le colocaron un dispositivo que genera vibraciones controladas que trabaja a unas frecuencia de 120 *Hz* usando el circuito con un rectificador, un filtro y un convertidor conmutado. Para el escenario uno se cambió el elemento piezoeléctrico a uno con mayor vector de desplazamiento eléctrico, mayores dimensiones y amplificando mecánicamente el impacto, en este caso sí se modificó la arquitectura del circuito eléctrico, el cual se le añadió un puente de diodos y a la salida se le colocó un condensador, para poder cargar los dispositivos de almacenamiento de electricidad. El resultado del estudio revela que el escenario con mayor eficiencia es el de impacto ya que permite generar y almacenar la energía producida en menor tiempo.<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> JIMÉNEZ MARTÍNEZ, Francisco Javier; DE FRUTOS, José Alonso David; VÁZQUEZ, Manuel. Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2015. Vol. 54. Nro. 6. ISSN. 21730431. P. 247

<sup>16</sup> *Ibíd.*, P. 248

El estudiante Jorge Cifuentes<sup>17</sup> de la universidad de envigado hace un estudio del de la fiabilidad de la instalación de elementos piezoeléctricos en la parte superior de las baldosas de concreto, para esto el autor propone usar las baldosas de concretos comerciales en el mercado, con unas dimensiones de 60cm por 60 cm, donde hace las simulaciones en serie y en paralelo. El autor hace varias simulaciones donde varia el lugar de instalación del puente rectificador para identificar la posición que más favorece a la generación de energía eléctrica. Con esto el autor identifica que el puente rectificador se conecta a continuación del sensor piezoeléctrico, así mismo se identifica la conexión más viable es la conexión en paralelo, con esto la baldosa es capaz de producir hasta  $9.25mW$ .

En la investigación realizada por el ingeniero Castellanos<sup>18</sup> sobre la evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico para generación de energía, se caracterizó por ser esencialmente experimental y de carácter exploratorio, donde la idea principal es diseñar una cerámica piezoeléctrica, la cual pueda ser usada como mecanismo de generación de electricidad. Durante el proceso de este estudio el autor hace un recorrido por los diferentes tipos de materiales piezoeléctricos, cambiando los niveles de espesor de la lámina y utilizando diferentes niveles de temperatura para el secado, todo esto con el fin de obtener una placa capaz de soportar una fuerza de  $10\text{ Kg}$ , un voltaje de  $45\text{ V}$  y una corriente de  $10\ \mu A$ . Después de diseñar y fabricar la cerámica piezoeléctrica a usar, se analizó el comportamiento del pulso eléctrico bajo diferentes fuerzas mecánicas y se evidencia que a mayor fuerza mecánica mayor productividad de energía, teniendo esto, el autor decide utilizar lo fabricado en un reductor de velocidad el cual fue ubicado el parqueadero de la Universidad Minuto de Dios, con esto el autor concluye que este tipo de energías se podrían usar para alimentar la lámparas que iluminan los parqueaderos pero es directamente proporcional la cantidad de vehículos que transitan por esta zona con la cantidad de energía producida por los elementos piezoeléctricos.<sup>19</sup>

El estudiante Arturo Martin Malmcroma<sup>20</sup> de La Universidad Carlos III de Madrid, realiza en estudio de diseño para la recuperación de energía eléctrica a través de los sensores piezoeléctricos, adicionalmente hace un estudio de las posibles escenarios para la generación de esta energía, teóricamente hace los cálculos

---

<sup>17</sup> CIFUENTES GUTIÉRREZ, Jorge Andrés. baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético. Trabajo de grado. Envigado. escuela de ingeniería de Antioquia. ingeniería mecatrónica. 2013. P. 102

<sup>18</sup> CASTELLANOS, Nobel. Evaluación Preliminar del Uso del Efecto Piezoeléctrico para Generación de Energía. Revistas académicas - INVENTUM. 2013 Vol. 8. Nro. 15. ISSN. 1909-2520. P. 35

<sup>19</sup> *Ibíd.*, P. 37

<sup>20</sup> MALMCROMA Arturo Martin. Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía. Trabajo de grado. Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universidad Carlos III de Mdrid. 2018. P. 115.

correspondientes, y de acuerdo a estos resultados hace las posibles instalación de los piezoeléctricos, adicionalmente el autor hace un caso de estudio donde hace una baldosa tipo sándwich de medidas  $50\text{cm}$  por  $50\text{cm}$  y contiene cuatro piezoeléctricos en paralelo donde para una persona de peso promedio de  $75\text{Kg}$  la baldosa es capaz de generar una potencia instantánea de hasta  $5\text{mW}$ , para incrementar el rango de estudio el autor realizo la instalación de los sensores piezoeléctricos en las plantillas de los zapatos la acciona al momento de caminar, siendo capaz de producir hasta  $11,5\text{mW}$  de potencia instantánea, esto identifica las diferentes posibilidades de generación de energía eléctrica, con el uso de elementos piezoeléctricos.

En una publicación realizada por la revista internacional de energía eléctrica e informática<sup>21</sup>, llamada aplicación de materiales piezoeléctricos en carreteras inteligentes y MENS, generación de energía PMPG con película delgada de modo transversal PZT donde realiza un análisis de la energía eléctrica en su país, para el año de la publicación del artículo, solo el 46% de la población de Pakistán cuentan con energía eléctrica, el resto de población viven aún en la oscuridad, los ciudadanos de este país viven una crisis energética. Otro factor importante que comentan los autores del artículo, es el gran consumo de energía eléctrica que se requiere para el funcionamiento de la tecnología, para ello los autores presentan una metodología de producción de energía eléctrica libre de algún tipo de contaminación, usando el efecto piezoeléctrico, donde este elemento es instalado en un dispositivo creado por ellos. La propuesta de los autores es instalar este dispositivo en las principales vías del país donde transitan una gran cantidad de vehículos tanto de carga, como particulares, por lo tanto al momento en que la llanta circula sobre el dispositivo producirá energía eléctrica que podrá usarse para cualquier dispositivo electrónico y lo más importante es que no afectará el medio ambiente.<sup>22</sup>

La agencia internacional de energía<sup>23</sup> en la sección revisión energética mundial del 2020 hace un reportaje llamado los impactos de la crisis de Covid-19 en la demanda global de energía y las emisiones de dióxido de carbono  $CO_2$ , en el cual hacen una comparación del consumo de energía eléctrica a nivel mundial, para el primer trimestre del 2020 se evidencia una reducción del consumo de energía del 3,8% con respecto al primer trimestre del 2019, donde se muestra una disminución del

---

<sup>21</sup> ABBASI, Aqsa. Application of Piezoelectric Materials and Piezoelectric Network for Smart Roads. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2013. vol. 3, nro. 6. ISSN 2088-8708. P. 857.

<sup>22</sup> *Ibíd.*, p. 857

<sup>23</sup> IEA. Los impactos de la crisis del covid2019 en la demanda global de energía y las emisiones de CO2. 2020. [sitio web] [consultado 30 de enero del 2021]. Disponible en <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>

consumo del 20% durante las medidas de confinamiento que se llevaron a cabo en Europa, América del Norte y otros lugares, el consumo de esta energía se redujo significativamente en la industria, pero se evidencia el aumento del consumo en los hogares, ya que el ser humano afronto el confinamiento, donde la humanidad ha tenido que estudiar, trabajar y hacer diferentes actividades que impactaron en este aumento. La (IEA) hace una estimación la cual menciona que la energía eléctrica tendrá una reducción del 5% y en algunas regiones del mundo hasta del 10%, esto a su vez es contradictorio ya que afecta la economía a nivel mundial, la humanidad se beneficia ya que también se estima una baja en la producción de dióxido de carbono  $CO_2$  en un 8% lo cual sería un estimado de 2.6 gigatoneladas, se llegaría a niveles de producción de hace 10 años y sería la reducción anual más grande de la historia.<sup>24</sup>

En un artículo realizado por Boon, Heoy, Izyan, Syaiful, Fatin y Rini<sup>25</sup>, comentan sobre la implementación de materiales piezoeléctricos en las baldosas del aeropuerto internacional Kuala Lumpur de Malasia, ya que por estudios realizados, la energía cinética podría ser usada por las personas que visitan el aeropuerto, las baldosas se ubicaron en las entradas principales, a medida que el proyecto fue creciendo se fueron ubicando baldosas en las áreas de comidas, en los corredores del área de tiendas y en otros lugares, esto es posible gracias a los 62000 pasajeros diarios que visitan este aeropuerto, para este proyecto se calculó que usando unas 48 baldosas podrían generar un total de 0.589 *KWh*.<sup>26</sup>

En la tesis hecha por los estudiantes Pérez y Velázquez<sup>27</sup> de la escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, hacen un estudio de los elementos piezoeléctricos, mostrando un análisis matemático de los parámetros eléctricos y mecánicos sobre los piezoeléctricos. Los autores diseñan una baldosa la cual contiene cristales piezoeléctricos que alimentaran luminarias de bajo consumo, estas podrán ser usadas en cualquier lugar, una vez obtenido el diseño continúan con la elaboración del prototipo, esta baldosa fue puesta en funcionamiento, la energía generada por

---

<sup>24</sup> *Ibíd.*, p.2

<sup>25</sup> BOON CHEONG Chew, et al Feasibility of Piezoelectric Tiles Adoption: A Case Study at Kuala Lumpur International Airport (KLIA) Malaysia, Faculty of Technology Management and Technopreneurship Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM), Malaysia. 2017. Vol 1818. ISBN. 9780735414860.

<sup>26</sup> *Ibíd.*, p.23

<sup>27</sup> PÉREZ PINEDA, Erick; VELAZQUEZ ALFARO Salvador. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Diseño E Implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia. 2016 [sitio web] [consultado el 30 de enero del 2021]. Disponible en <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21498/1/Dise%C3%B1o%20en%20implementaci%C3%B3n%20de%20un%20generador%20piezoel%C3%A9ctrico%20baldosa%2C%20para%20alimentar%20un%20sistema%20de%20iluminaci%C3%B3n%20de%20baja%20potencia.pdf>

los piezoeléctricos es almacenada en capacitores, luego en una mejora del proyecto usaron baterías pero el sistema se tornó un poco complejo, de esta manera los autores plantean mejoras para futuros proyectos.<sup>28</sup>

Innowattech Energy Harvesting System es una compañía que posee una de sus sedes en Israel, la cual se especializa por el estudio y desarrollo de dispositivos piezoeléctricos personalizados, esta empresa hace un estudio en el instituto tecnológico Technion de Haifa, donde se implantan dispositivos piezoeléctricos en una carretera de este instituto, estos piezoeléctricos están a una profundidad de 6 cm del nivel de la carretera y a una distancia entre los piezoeléctricos de 30 cm, con un sistema de tarjetas electrónicas, estos elementos pueden producir electricidad a través de cambios de peso, movimientos, vibraciones y temperatura. En este estudio la compañía almacena la energía producida por los piezoeléctricos en condensadores electrónicos, uno de los factores más importantes de esta tecnología es que en comparación a otras energías renovables, esta requiere menos presupuesto.<sup>29</sup>

Esta empresa hace un pronóstico de que la inversión en la implementación de estos prototipos puede retornar en un lapso de 6 a 12 años, como también comentan que sus dispositivos pueden llegar a generar hasta 400 *KWh* en un tramo de carretera de 1 *Km*, con un paso de al menos 600 vehículos en una hora, esta energía producida podrá cubrir la demanda de electricidad de alrededor de 600 a 800 hogares, en Israel posee carreteras que pueden llegar a producir hasta 160 *MWh* de energía usando sus dispositivos y esto podría llegar a cubrir hasta el 2% de la necesidad de energía de todo el país.<sup>30</sup>

En la revista Hindawi<sup>31</sup> publican un artículo con el nombre de generación de energía piezoeléctrica a partir del tráfico de vehículos con análisis tecno-económico, donde los autores hacen un estudio sobre la capacidad que poseen los piezoeléctricos para la conversión de vibraciones producida por los vehículos al momento de

---

<sup>28</sup> *Ibíd.*, p. 94

<sup>29</sup> HENDERSON, Tessa [sitio web] [consultado el 17 de febrero del 2021]. Disponible en <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/1589/energy-harvesting-roads-in-israel#:~:text=Innowattech%20Energy%20Harvesting%20Systems%20based,to%20roadways%20from%20passing%20vehicles.&text=The%20energy%20harvested%20was%20stored,capacitors%20of%20the%20storage%20system.>

<sup>30</sup> *Ibíd.*, p. 5.

<sup>31</sup> NAJINI, Hiba; MUTHUKUMARASWAMY, Senthil Arumugam. Piezoelectric Energy Generation from Vehicle Traffic with Technoeconomic Analysis. *Journal of Renewable Energy*. 2017 vol. 2017 ISBN. 2314-4386

transitar por las vías del lugar de análisis, para esto se instaló el elemento piezoeléctrico a una distancia de 5 cm del nivel de la carretera, este dispositivo es capaz de convertir la energía cinética y las vibraciones en energía eléctrica, donde se estudiaron el paso de 500 vehículos en una hora a velocidades entre los 80 a 120 *km* por hora, para este escenario los dispositivos piezoeléctricos fueron capaces de producir aproximadamente entre 137 *KWh* a 469 *KWh* respectivamente, los autores hacen un análisis donde comentan que este tipo de generadores de electricidad también podría motivar el diseño y desarrollo de vehículos inteligentes y esto ayudaría a la reducción de carbono en el medio ambiente.<sup>32</sup>

La empresa Pavegen en los últimos años se ha interesado por el desarrollo de los piezoeléctricos, esta empresa obtiene energía limpia a través de baldosas, ha logrado grandes contratos para hacer el montaje de su sistema de generación de energías limpias en las grandes ciudades a nivel mundial como son Rumania, Londres, Hong Kong, México, Bangkok entre otros,<sup>33</sup> la energía producida por el desarrollo de este sistema principalmente se ha enfocado para la alimentación de los sistemas de iluminación de los lugares donde se instalan, así misma esta energía también puede ser usada para la alimentación farolas e incluso cargar dispositivos electrónicos, este sistema se caracteriza por tener una batería interna en el dispositivo lo cual le permite almacenar la energía que él mismo produce.

Algunos de sus dispositivos cuentan con un sistema de led, al momento que la persona pisa esta baldosa este led se ilumina y así mismo produce energía para cargar la batería, la construcción de esta baldosa tiene un led que se enciende una vez es pisada, de esta manera la hace más llamativa a los peatones, así mismo genera una mayor cantidad de energía eléctrica. Según la compañía este dispositivo tiene una vida útil de hasta 20 millones de pasos y podría generar electricidad de hasta 0,29 voltios en una hora<sup>34</sup>, En la figura 3 se muestra una imagen de la baldosa convencional de la empresa Pavegen.

*Figura 3. Imagen de una baldosa de la compañía Pavegen*

---

<sup>32</sup> *Ibíd.*, p 17

<sup>33</sup> Pavegen. [sitio web] [consultado el 18 de febrero del 2021]. Disponible en <https://pavegen.com/>

<sup>34</sup> ALI Ali; NG MELANIE Wang, Grace University of British Columbia UBC Bookstore Plastic Bag Alternative 2020





Fuente: Pavegen<sup>35</sup>

En la tesis Diseño y construcción de un generador eléctrico de desplazamiento lineal con imanes permanentes para acoplamiento a un aerogenerador de eje vertical, los autores realizan varios prototipos hasta encontrar el más eficiente para la generación de energías limpias, estos prototipos fueron diseñados con el uso de bobinas e imanes de neodimio, los investigadores implementaron un sistema de generación de energía a través de movimientos lineales repetitivos con un circuito rectificador de onda para convertir la energía alterna en energía continua, y así poder ser almacenada en baterías, para este estudio no se contaba con información, pero los diseñadores se basaron en el desarrollo experimental, dando como resultado un voltaje medio de 3 voltios, un voltaje eficaz de 6,3 voltios a 300 ciclos por minuto. Para llegar hasta esta cantidad de revoluciones los autores modificaron los diseños e integraron a estos un motor que les permitió llegar a esta cantidad de ciclos o revoluciones por minuto.<sup>36</sup>

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según la OMS las enfermedades a causa de la contaminación ambiental están cada vez más en aumento y de hecho estas enfermedades ocupan los primeros puestos

---

<sup>35</sup> Pavegen [online] [consultado el 18 de febrero del 2021]<https://pavegen.com/>

<sup>36</sup> QUICHIMBO ARMIJOS, Juan Carlos Diseño y construcción de un generador eléctrico de desplazamiento lineal con imanes permanentes para acoplamiento a un aerogenerador de eje vertical. Trabajo de grado Loja Ecuador Universidad Nacional de Loja. Área De La Energía, Las Industrias Y Los Recursos Naturales No Renovables. 2013.

de causas de muertes en el mundo<sup>37</sup>, por lo que se ha hecho imperativo cada vez más buscar soluciones de sostenibilidad ambiental, que permitan mitigar estos riesgos en salud y en el planeta mismo. El uso desmedido de energía eléctrica ha desencadenado un desequilibrio en el planeta. Las emisiones de gases de efecto invernadero afectan cada vez la capa de ozono, y como consecuencia cambios bruscos en el clima, lo cual causa daños irreversibles en el medio ambiente, los ecosistemas y la humanidad.

Es por esto, que encontrar soluciones en cuanto a energías renovables se convierte en todo un desafío no solo ambiental, sino tecnológico, donde en la mayoría de países en el mundo están dando foco, buscando aplicar nuevas estrategias para contrarrestar este fenómeno y empezar a conservar lo más importante, el planeta tierra. Es por esto que los piezoeléctricos en la actualidad son considerados una nueva forma de energía renovable<sup>38</sup>, material que puede generar energía saludable para el medio ambiente, aprovechando los movimientos humanos, en este caso ejerciendo una fuerza con la pisada, en lugares de alta afluencia peatonal, esto generará un impacto positivo para el medio ambiente y disminución en el uso de combustibles fósiles.

En la actualidad Colombia cuenta con 1710 localidades rurales que solo acceden a energía eléctrica en un rango de 4 a 12 horas al día, en estas localidades los centros educativos solo laboran en jornada diurna ya que el suministro eléctrico no es suficiente, para poder funcionar en horas de la noche, adicionalmente se ve afectado los servicios de salud, ya que requieren de dispositivos electrónicos para mejorar la prestación del servicio a los pacientes.<sup>39</sup>

La generación de energía eléctrica con los sensores piezoeléctricos es una tecnología que está en esparcimiento y en etapa evolutiva, en este momento grandes empresas se han interesado por este modelo de generación de energías

---

<sup>37</sup> Nueve de cada diez personas en todo el mundo respiran aire contaminado [sitio web] Bogotá. [consultado el 26 de marzo del 2021] disponible en <https://www.who.int/phe/es/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20nuevos%20datos%20de%20la,dom%C3%A9stico%3B%20es%20una%20cifra%20alarmante>.

<sup>38</sup> TWENERGY. [sitio web]. Bogotá. [consultado el 26 de marzo del 2021] disponible en <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/sensores-piezoelctricos-una-nueva-forma-de-energia-renovable/>.

<sup>39</sup> El tiempo. [sitio web]. Bogotá. [consulta: 15 de marzo 2021]. Disponible en <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-poblados-que-aun-no-tienen-energia-electrica-en-colombia-324980#:~:text=Los%20departamentos%20que%20encabezan%20la,Valle%20del%20Cauca%2C%20con%2081>.

limpias. La selección de los sensores piezoeléctricos se basó en el alcance económico del autor del proyecto, esto impactará a la generación de energía eléctrica ya que se considera un piezoeléctrico que produzca una mayor cantidad de energía, el costo del mismo puede ser elevado. Para esto se obtuvo elementos piezoeléctricos económicamente asequibles.

El poco conocimiento de esta tecnología en las personas, no permite saber el desempeño exacto de estos sensores piezoeléctricos, de esta manera no se sabe la cantidad de potencia que pueden generar estos dispositivos, es una tecnología que está en crecimiento, la hoja técnica de estos sensores no muestra indicios de las posibles conexiones o configuraciones para lograr una mayor cantidad de energía eléctrica.

Basado en lo anterior, para este proyecto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué tanta energía se puede generar con una baldosa basada en elementos piezoeléctricos?

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de un sistema tipo baldosa con elementos piezoeléctricos.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar los antecedentes encontrados sobre los prototipos generadores de electricidad mediante el caminar de las personas.
- Definir los requerimientos del sistema de transformación de energía mecánica a energía eléctrica a través de las pisadas.
- Implementar el diseño del prototipo tipo baldosa generadora de electricidad

con el uso de elementos piezoeléctricos.

- Estimar la energía generada por el prototipo mediante mediciones de potencia.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

Durante años, el ser humano ha sido el principal responsable de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha causado un impacto negativo para el medio ambiente, por este motivo la humanidad está viviendo grandes afectaciones en el planeta, uno de ellos es el calentamiento global, la situación es tan crítica que la agencia internacional de energía ha pronosticado que para el 2050 estas emisiones se incrementarían en un 130% si la humanidad continúa con el mismo estilo de vida.<sup>40</sup>

En el 2018 la organización mundial de la salud emitió un reporte sobre la contaminación del aire donde indica que 9 de cada 10 personas en el mundo respira aire contaminado, también indican que debido a esta contaminación en el mundo se registran 7 millones de muertes cada año.<sup>41</sup>

En Colombia, en un boletín de prensa del instituto nacional de salud se registran 17.549 muertes por causa de la contaminación que tiene el aire y el agua, en otras palabras es el 8% de la mortalidad total que se registra en el país, lo que encontraron los investigadores del Instituto Nacional de Salud (INS), es que estas muertes se registran en 7 padecimientos principales, los cuales son enfermedades isquémicas del corazón, el accidente cerebrovascular, la enfermedad pulmonar obstructiva, las infecciones respiratorias agudas, el cáncer de pulmón, la enfermedad diarreica aguda, y la enfermedad renal crónica.<sup>42</sup>

---

<sup>40</sup> Sostenibilidad para todos. Top 5 países más contaminantes [ sitio web ] [consultado 25 de enero del 2021]. Disponible en <https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/top-5-paises-mas-contaminantes/>.

<sup>41</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental. [sitio web] [consultado 28 de enero del 2021]. Disponible en <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>.

<sup>42</sup> Instituto Nacional de salud | informe carga de enfermedad ambiental en Colombia [sitio web] [consultado el 2 de febrero del 2021]. Disponible en <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/Informe-Carga-de-Enfermedad-Ambiental-en-Colombia.aspx>.

Esto representa costos elevados para el estado, dado que cada vez son más las personas que se enferman y mueren a causa de la contaminación ambiental, según cifras de la Organización Mundial de la Salud (OMS), una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial, es ocasionada por la contaminación del aire. Lo cual es un número muy elevado, que obliga a hacer una pausa y revisar cómo se están llevando a cabo los procesos de generación de energía. Según informes del Departamento Nacional de Planeación (DNP), en 2015, “Los efectos de este fenómeno ambiental estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades”<sup>43</sup>. Por lo tanto, los costos ambientales, asociados a la contaminación atmosférica en Colombia han incrementado de manera significativa, según el DNP, “Pasaron de 1,1% del PIB de 2009 (\$5,7 billones de pesos) a 1,59% del PIB de 2014 (\$12 billones de pesos) y de 1,93% del PIB en 2015 (\$15.4 billones de pesos)”<sup>44</sup>, lo cual hace evidente la necesidad de empezar a buscar alternativas y estrategias que permitan controlar y hacer más eficientes los sistemas de energía en nuestro país y en el mundo.<sup>45</sup>

El uso de energías renovables o sostenibles<sup>46</sup> para el medio ambiente, como los piezoeléctricos en la implementación de estructuras tipo baldosas para la generación de energías limpias, resultan ser una gran alternativa, son un escalón más para contribuir al mejoramiento del medio ambiente, es importante lograr aprovechar la ventaja de poder contar actualmente con minerales óptimos para esta nueva generación de energía y si esta está acompañado de un programa de concientización a la humanidad, los resultados, sin duda en poco tiempo se verán reflejados en el mejoramiento de la salud ambiental y humana.

Las acciones preventivas de cada persona, siempre serán fundamentales para la conservación del medio ambiente, pero si estas acciones se le suma mecanismos industriales amigables con el medio ambiente, la disminución de enfermedades y muertes a causa de esta contaminación rápidamente empezará a bajar, aprovechar lugares de concurrencia alta será la base de este proyecto para la utilización de dispositivos tipo baldosas construidos con piezoeléctricos.

---

<sup>43</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales de Colombia. Calidad del Aire. [ sitio web] [consultado el 30 de enero del 2021]. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>.

<sup>44</sup> *Ibíd.*, P. 7

<sup>45</sup> *Ibíd.*, P. 12

<sup>46</sup> UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA. Que son las energías renovables o sostenibles [sitio web] [consultado el 23 de febrero del 2021] disponible en <https://www.upb.edu.co/es/central-blogs/sostenibilidad/energias-renovables-y-sostenibles>

En los últimos años, los avances tecnológicos han evolucionado significativamente acompañados de simulaciones computarizadas y pruebas de prototipos, en los cuales se podrá determinar la viabilidad de un proyecto para contribuir a la mejora de generación de energía, minimizando el uso de combustibles fósiles.

La implementación de un sistema de generación de energía limpias a través de dispositivos tipo baldosa construidos con piezoeléctricos representa un beneficio no solo para la economía<sup>47</sup>, sino también para la humanidad y el planeta. Lograr la optimización y utilización de algo tan cotidiano como es el movimiento humano al caminar, es algo que en las condiciones actuales se debe aprovechar. Es por esto que en este proyecto se propone un prototipo tipo baldosa, en lugares altamente concurridos, con el fin de contar con el mayor número de personas, que puedan accionar este sistema, alrededor de 10 pisadas por minuto, ya que esto es directamente proporcional a la generación de energía eléctrica. Las enfermedades respiratorias a causa del medio ambiente conllevan importantes efectos económicos tanto a nivel social como para las propias familias. En Colombia, el Ministerio de Salud de Colombia gasta gran parte de su presupuesto, destinado a centros de salud, en tratamientos médicos causados por la contaminación ambiental.

## **1.5 DELIMITACIÓN**

### **1.5.1 Delimitación Espacial**

Este proyecto implementa un sistema de generación de energía limpia, pero para lograr su mayor eficiencia requiere ser instalado en un lugar con gran cantidad de afluencia de transeúntes para el accionar del sistema, ya que la generación de energía eléctrica es directamente proporcional al accionamiento de la baldosa.

---

<sup>47</sup> ATAGÓN, Fredy. análisis de la factibilidad económica y ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus de la universidad militar nueva granada. Bogotá. Trabajo de grado (análisis de la factibilidad económica y ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus de la universidad militar nueva granada) Universidad Nueva Granada faculta de electrónica.

## 1.5.2 Delimitación Temporal

El proyecto se ejecutó en un tiempo de cuatro meses, con fecha de inicio el 12 de febrero de 2021.

## 1.5.3 Delimitación del Contenido

El dispositivo esta propuesto para tener otro medio de producción de energía eléctrica, aprovechando el caminar del ser humano.

## 1.6 MARCO REFERECIAL

A continuación, se detallan las principales teorías y conceptos relevantes para el desarrollo del proyecto, comenzando con las teorías básicas desde una perspectiva de ingeniería (conceptos básicos que define la ingeniería para la transformación de energía mecánica a energía eléctrica) y tecnológica. Finalmente, en el marco conceptual, se presentan las definiciones de los conceptos tecnológicos más relevantes para el desarrollo de este proyecto.

### 1.6.1 MARCO TEORICO

#### 1.6.1.1 Historia Del Piezoeléctrico

Los hermanos Jaques Curie (29 de octubre de 1855 – 19 de febrero de 1941)<sup>48</sup> y Pierre Curie (15 de mayo de 1859 – 19 de abril de 1906)<sup>49</sup>, franceses, físicos, anunciaron a la academia francesa de ciencias el 2 de agosto de 1880<sup>50</sup>, el

---

<sup>48</sup> Google arts. & culture [sitio web] [consultado el 12 de febrero de 2021]. Disponible en <https://artsandculture.google.com/entity/jacques-curie/m0ggv6w?hl=es>.

<sup>49</sup> Wikipedia. [sitio web] [consultado el 12 de febrero de 2021]. Disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/Pierre\\_Curie](https://es.wikipedia.org/wiki/Pierre_Curie).

<sup>50</sup> KATZIR, SHAUL | THE DISCOVERY OF THE PIEZOELECTRIC EFFECT. *THE APPEARANCE OF THE EFFECT*. Springer Netherlands. 2007. P.15

descubrimiento del efecto piezoeléctrico. La palabra “piezo” se deriva de la palabra griega “piezein” que significa estrechar, apretar u oprimir.

Estos hermanos analizaron tipos de cristales que contienen uno o más ejes con extremos diferentes, en otras palabras, los cristales hemiédricos con caras oblicuas, contienen una propiedad física, lo cual permite tener una polaridad eléctrica. Este otro método para la obtención de electricidad polar usando ciertos cristales, sometiéndolos a variaciones de presión a través de sus ejes<sup>51</sup> Esta polarización es proporcional a la tensión aplicada. Estos jóvenes examinaron cristales como Turmalina, topacio, sal de Rochelle y cuarzo, donde colocaron una muestra de estos cristales entre 2 placas de cobre perpendiculares a su eje hemiédrico, estas placas están aisladas eléctricamente del medio ambiente, colocaron un tornillo de banco con el cual las muestras se comprimen y se descomprimen, repitiendo esta acción varias veces y con ayuda, esto está conectado a un electrómetro de cuadrante de Thomson. De esta manera se podía observar la polarización que tomaban los cristales a ciertos escenarios, siendo esta la primera demostración del efecto piezoeléctrico.

El efecto piezoeléctrico pasó unos años como un descubrimiento experimental hasta que en 1910 el Alemán Woldemar Voigt usando las bases de los hermanos Curie, hace una publicación de un libro llamado “Física de cristales” (en Alemán lehrbuch der Kristallphysik), donde define los 20 cristales naturales que son capaces de producir efecto piezoeléctrico, usando la termodinámica y un análisis tensorial.<sup>52</sup>

En 1917 el físico francés Paul Langevin, junto con su equipo de investigación desarrollaron un detector ultrasónico para submarinos, este transductor está compuesto por cristales cuarzo instalados en dos placas de acero, esto manejaba una frecuencia de resonancia de 50 *KHz*, donde también tenía instalado un hidrófono para poder analizar el eco. Teniendo este sistema se enviaron sonidos a frecuencias altas, estos sonidos impactaron a los diversos materiales que se encuentran en los océanos, estas frecuencias después del impacto retornan al submarino, el tiempo que estas demoraban en retornar al submarino Paul Langevin

---

<sup>51</sup> *Ibíd.*, P.17

<sup>52</sup> MOLINA GÓMEZ Álvaro Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos | Trabajo de grado UNIVERSIDAD DE ALCALÁ Escuela Politécnica Superior | tecnología de telecomunicaciones. 2018. P.60.



y su equipo de trabajo podían saber a qué distancia estaban esos objetos del submarino, esta tecnología es usada hasta la fecha ya que ha sido muy eficiente.<sup>53</sup>

Entre los años 1918 y 1939 se usaron los piezoeléctricos para el desarrollo de tecnologías que se usa en la actualidad como lo son los micrófonos, acelerómetros, filtros de señal. Durante la segunda guerra mundial países como Estados Unidos, Japón y la Unión Soviética realizaron investigaciones sobre las aplicaciones que se les podría dar a los piezoeléctricos, donde descubrieron que los materiales ferroeléctricos poseen constantes dieléctricas mayores a la de los cristales naturales. Esto impulsó a realizar investigaciones más exhaustivas a estos materiales donde finalmente culminaron con el desarrollo materiales piezoeléctricos sintéticos como titanio de Bario y titanio circonato de plomo.<sup>54</sup>

En 1969 Kawai obtiene el polímero piezoeléctrico (fluoruro de vinilideno) PVDF, y sus propiedades especiales gracias a sus dipolos CF<sub>2</sub> cuando se encuentran alineados, este descubrimiento fue de gran ayuda al avance tecnológico del momento, sin embargo para lograr alinear estos elementos se tornaba complicado y un poco costoso así mismo este elemento solo soportaba una temperatura máxima de 80°C lo que restringe su temperatura de operación y/o funcionamiento.<sup>55</sup>

### 1.6.1.2 Ecuaciones Matemáticas Del Efecto Piezoeléctrico

Las ecuaciones de los materiales piezoeléctricos relacionan tensiones, deformaciones y comportamiento eléctrico.

---

<sup>53</sup> Ibíd., p.34

<sup>54</sup> PÉREZ PINEDA Erick; VELÁSQUEZ ALFARO Salvador | Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia. Trabajo de grado Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. 2016 p. 90

<sup>55</sup> Universidad del País Vasco | polímeros con propiedades eléctricas [sitio web] [consultado el 12 de febrero de 2021]. Disponible en <https://www.ehu.eus/es/web/labquimac/ikerkuntza-lerroak-#:~:text=Los%20pol%C3%ADmeros%20piezoel%C3%A9ctricos%20se%20engloban,griega%20piezo%20que%20significa%20presi%C3%B3n.>

Ecuación 1. (1)

$$P = dT$$

Donde:

$d$  = Constante de carga piezoeléctrico ( $m/v$  ó  $C/N$ )

$P$  = Vector de polarización piezoeléctrica

$T$  = Tensión mecánica aplicada ( $N/m^2$ )

Ecuación 2. (2)

$$P = D - \epsilon^T E$$

Donde:

$\epsilon$  = Permitividad

$E$  = Campo eléctrico ( $V/m$ )

$D$  = Desplazamiento eléctrico

Ecuación 3. Estas ecuaciones se pueden relacionar entre carga y deformación

(3)

$$D = dT + \epsilon^T E$$

$$E = gT + \frac{D}{\epsilon^T}$$

Donde:

$d$  = Constante de carga piezoeléctrico ( $m/v$  ó  $C/N$ )

$g$  = Constante de carga piezoeléctrica ( $Vm/N$ )

$\epsilon^T$  = Permitividad ( $F/m$ )

$T$  = Tensión mecánica aplicada ( $N/m^2$ )

Ecuación 4. Cuando el campo eléctrico es creado por una tensión mecánica

(4)

$$S = dE$$

$$S = gD$$

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T}$$

Donde:

$d$  = Constante de carga piezoeléctrica ( $m/v$  ó  $C/N$ )

$g$  = Constante de carga piezoeléctrica ( $Vm/N$ )

$D$  = Desplazamiento eléctrico ( $C/m^2$ )

$S$  = Deformación mecánica ( $m/m$ )

$E$  = Campo eléctrico ( $V/m$ )

Tabla 1. Constantes piezoeléctricas.

Símbolo	Nombre	Unidades	Comentario
$e$	Tensión piezoeléctrica	$\frac{N}{mV}$	$e = \frac{1}{g}$
$\varepsilon$	Permitividad del medio	$\frac{F}{m}$	$\varepsilon = \frac{1}{\beta}$
$d$	Deformación piezoeléctrica	$\frac{m}{V}$	$d = \frac{1}{h}$
$s$	Compliancia del medio	$\frac{m^2}{N}$	-
$g$	Constante piezoeléctrica	$\frac{Vm}{N}$	
$D$	Desplazamiento eléctrico	$(C/m^2)$	-

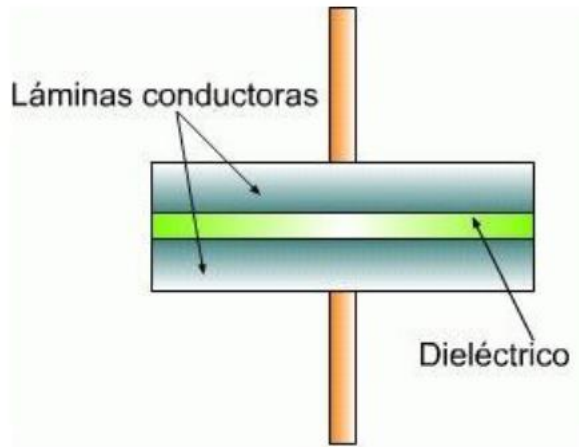
Fuente: Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia<sup>56</sup>.

<sup>56</sup> Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia. Bogotá. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA. 2016. P. 27.

### 1.6.1.3 Condensadores

Este dispositivo eléctrico internamente contiene dos placas o superficies conductoras en forma de láminas separadas por un material dieléctrico que hace la función de aislante de energía, este elemento aislante puede ser aire, tantalio, papel, aluminio, cerámica, y ciertos plásticos<sup>57</sup>. Estas placas son las que se cargan con la cantidad de carga ( $q$ ), pero cada una de ellas con distinta polaridad, una con polaridad positiva ( $+q$ ) y otra con polaridad negativa ( $-q$ ), en la figura 4 se muestra la sección interna de un condensador, indicando las dos placas y el elemento dieléctrico o aislante.

Figura 4. Sección interna de un condensador



Fuente: Condensador eléctrico<sup>58</sup>

La capacidad de almacenamiento de carga de un condensador se mide en la unidad Faradios, la mayoría de los condensadores tiene un rango de medida del pico ( $pF$ ) hasta los micro ( $\mu F$ ) faradios, en la ecuación 5 se muestra la capacidad de carga de un condensador.

Ecuación 5. Capacidad de carga de un condensador

$$C = q/v \quad (5)$$

Donde:

<sup>57</sup> *Ibíd.*, P4

<sup>58</sup> Condensador eléctrico [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://www.areatecnologia.com/electricidad/condensador.html>

$C$ : carga de un condensador ( $F$ )

$q$ : es la capacidad de carga de cada una de las placas ( $c$ )

$v$ : voltaje o tensión entre las dos laminas ( $v$ )

La ecuación 5 es usada para poder hallar la capacidad de carga de un condensador, ya que esta varía dependiendo la aplicación determinada del condensador.

#### 1.6.1.4 Carga Y Descarga De Un Condensador

##### Carga De Un Condensador

En el circuito donde se instala el condensador es aconsejable instalar una resistencia<sup>59</sup>, lo que logra una mayor dificultad del paso de la corriente al circuito, por eso cuanto más grande sea la resistencia mayor el tiempo de carga del condensador, en la ecuación 6 se puede hallar el tiempo de carga de un condensador

Ecuación 6. Tiempo de carga de un condensador

(6)

$$T1 = 5xR1xC$$

Donde:

$T1$ : tiempo de carga ( $\mu s$ )

$R1$ : resistencia de carga ( $\Omega$ )

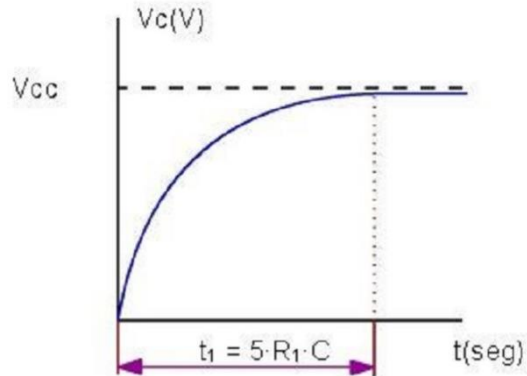
$C$ : capacitancia del condensador ( $F$ )

Con la ecuación anteriormente mencionada se muestra que, a mayor resistencia de carga, mayor será el tiempo de carga de un condensador<sup>60</sup>, para complementar esta información se muestra la figura 5 donde se presenta la gráfica de carga de un condensador con respecto al tiempo.

<sup>59</sup> Condensador eléctrico Op. Cit. P. 5.

<sup>60</sup> *Ibid.*, P. 5.

Figura 5. Grafica de carga de un condensador con respecto al tiempo



Fuente: Condensador eléctrico<sup>61</sup>

Cuando un condensador se carga, permite el paso de la tensión<sup>62</sup>, y se comporta como un circuito abierto que impide el paso de corriente, aunque si existe tensión o voltaje en ese momento. Inmediatamente el condensador comienza a liberar la tensión en una manera regulada, hacia el dispositivo que consume la carga.

### Descarga De Un Condensador

La descarga del condensador sucede de forma inversa a su carga<sup>63</sup>, esta descarga no sucede de forma inmediata, el condensador se va descargando paulatinamente dependiendo de la resistencia de salida ya que cuando es mayor es la resistencia de salida, mayor es el tiempo de descarga del condensador. La ecuación para definir el tiempo de descarga de un condensador es la misma a la de carga, como se muestra en la ecuación 6.

Como se muestra en la ecuación 6 se confirma que el tiempo de descarga del condensador es directamente proporcional a la resistencia<sup>64</sup>, para identificar mejor

<sup>61</sup> Condensador eléctrico: ¿Qué es?, funciones, importancia y más [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://tecnoinformatic.com/c-electronica/condensador/>

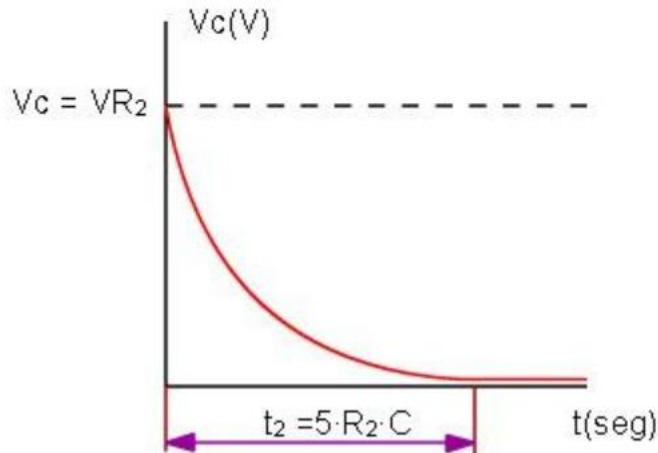
<sup>62</sup> CONDENSADOR ELECTRICO: ¿QUÉ ES?, FUNCIONES, Y MÁS [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://tecnoinformatic.com/c-electronica/condensador/>

<sup>63</sup> *Ibid.*, p. 2

<sup>64</sup> *Ibid.*, p. 5

esto se muestra la figura 6 de descarga de un condensador con respecto al tiempo

Figura 6. Descarga de un condensador con respecto al tiempo



Fuente: Condensador eléctrico<sup>65</sup>

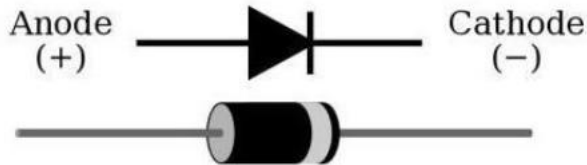
### 1.6.1.5 Diodos

Diodo 1n4007, se basa en una unión semiconductor normalmente de silicio, estos diodos por lo general resisten hasta  $200^\circ\text{C}$  en la unión, temperaturas muy elevadas con resistencias muy bajas, donde se comporta como un diodo rectificador de señal, estos son muy usados para la transformación de una señal alterna, a una señal directa<sup>66</sup>, el nombre de diodo proviene de su capacidad de separar la corriente en ciclos positivos de una señal alterna. En la figura 7 se muestra un diodo y el nombre de sus terminales.

<sup>65</sup> Condensador eléctrico: ¿Qué es?, funciones, importancia y más [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://tecnoinformatic.com/c-electronica/condensador/>

<sup>66</sup> Todo lo que necesitas saber sobre este diodo [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://www.hwlibre.com/1n4007/>

Figura 7. Diodo y sus terminales



Fuente: todo lo que necesitas saber sobre este diodo<sup>67</sup>

#### 1.6.1.6 Rectificador de onda completa

Se selecciona un puente rectificador de diodos para este proyecto ya que los sensores piezoeléctricos son capaces de producir voltajes positivos y negativos<sup>68</sup>, de esta manera el puente rectificador de diodos convierte el voltaje negativo en voltajes positivos, con este dispositivo, el circuito de los piezoeléctricos genera una mayor cantidad de voltaje. En la figura 8 se muestra el circuito rectificador de onda.

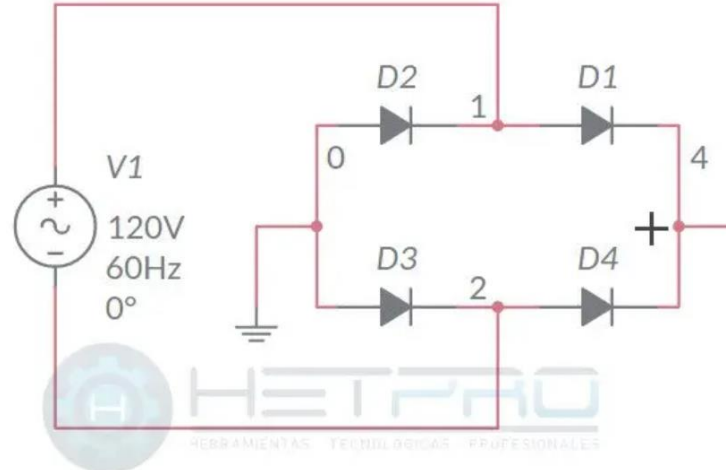
Figura 8. Circuito rectificador de onda completa

---

<sup>67</sup> *Ibíd.*, P1

<sup>68</sup> Piezoelectricidad: usando las pisadas de los ciudadanos para generar energía [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://www.smartcitylab.com/blog/es/transformacion-digital/piezoelectricidad-generar-energia-con-movimiento/>



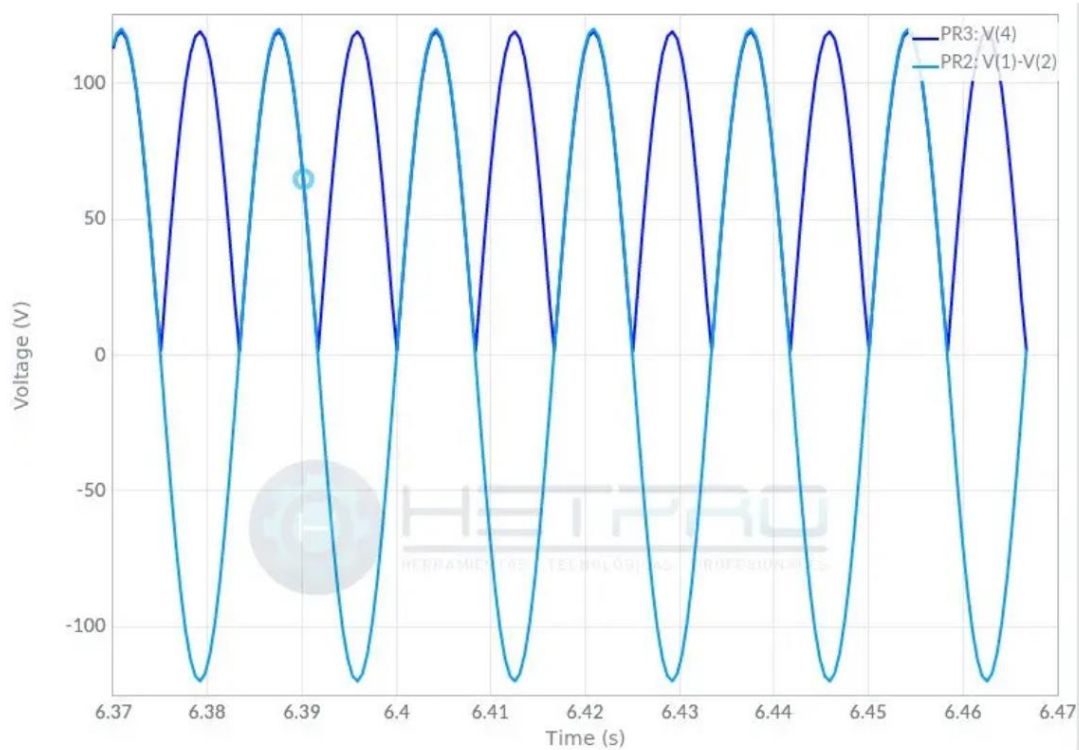


Fuente: Rectificador de Onda Completa<sup>69</sup>

Teniendo el circuito interno de un rectificador de onda completa, en la figura 9 se indica como es transformada la señal, eliminando los voltajes negativos y convirtiéndolos en voltajes positivos, esto es importante ya que hace del prototipo más eficiente.

Figura 9. Onda senoidal modificada por el rectificador de onda completa

<sup>69</sup> Rectificador de Onda Completa<sup>69</sup> [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/rectificador-de-onda-completa/>



Fuente: Rectificador de Onda Completa<sup>70</sup>

## 1.6.2 MARCO CONCEPTUAL

### 1.6.2.1 Energías Limpias

Es un sistema de producción de energía donde excluye totalmente algún tipo de contaminación para el medio ambiente, para la producción de energía no se genera ningún tipo de residuos que pueden ser altamente peligrosos para el medio ambiente, el interés de la humanidad por las energías limpias va creciendo desde hace varios años, ya que esta contribuye a la preservación del medio ambiente.<sup>71</sup>

<sup>70</sup> *Ibíd.*, P.3

<sup>71</sup> ¿Qué significa energía limpia? Compromiso RCE customedia 2010 [sitio web] [consultado 10 de enero de 2021] Disponible en <https://www.compromisorse.com/sabias-que/2010/03/30/que-significa-energia-limpia/>

### 1.6.2.2 Combustibles Fósiles

Son llamados combustibles fósiles porque se crearon a raíz de organismos que murieron y quedaron bajo muchas capas de tierra y rocas llamadas sedimentos, los combustibles fósiles son: petróleo, carbón y gas natural. El petróleo se originó de microorganismos que vivieron en el océano hace millones de años, el carbón está compuesto de plantas y animales que vivieron en la tierra, y el gas natural está compuesto de los organismos y plantas que vivieron en la tierra y en los océanos hace miles de millones de años, estos combustibles no son renovables o tendría que pasar muchos años con las mismas condiciones para que se originen estos combustibles.<sup>72</sup>

### 1.6.2.3 Piezoeléctricos

Es un material que es capaz de generar energía eléctrica cuando es expuesto a fuerzas mecánicas, esto es posible gracias a la composición química que contienen, cuando este material es sometido a tensiones mecánicas obtienen una polarización eléctrica en su masa, esto a su vez produce una diferencia de potencial y genera la aparición de energía eléctrica en su superficie.<sup>73</sup>

### 1.6.2.4 Tipos de Cristales Piezoeléctricos más usados

- **Tipo pila**

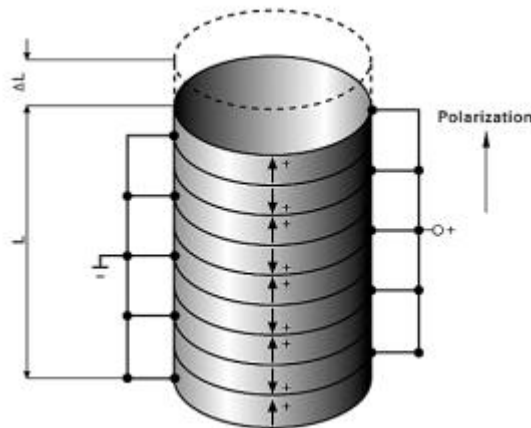
---

<sup>72</sup> RICE B, Willian. La historia de los combustibles fósiles (The Story of Fossil Fuels) 6-Pack - Google Libros. Teacher Created Materials, 2017 0-32p. ISBN 1425848044, 9781425848040.

<sup>73</sup> Universidad del Magdalena | Generación de Energía Eléctrica Mediante el Uso de Material Piezoeléctrico. 2017 [sitio web] [consultado el 15 de enero del 2021]. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Gerardo\\_Angulo-Cuentas/publication/321833041\\_GENERACION\\_DE\\_ENERGIA\\_ELECTRICA\\_MEDIANTE\\_EL\\_USO\\_DE\\_MATERIA\\_L\\_PIEZOELECTRICO\\_2010-2017/links/5a33e6db45851532e82c94ce/GENERACION-DE-ENERGIA-ELECTRICA-MEDIANTE-EL-USO-DE-MATERIAL-PIZOELECTRICO-2010-2017.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gerardo_Angulo-Cuentas/publication/321833041_GENERACION_DE_ENERGIA_ELECTRICA_MEDIANTE_EL_USO_DE_MATERIA_L_PIEZOELECTRICO_2010-2017/links/5a33e6db45851532e82c94ce/GENERACION-DE-ENERGIA-ELECTRICA-MEDIANTE-EL-USO-DE-MATERIAL-PIZOELECTRICO-2010-2017.pdf)

Este es uno de los más comunes, ya que contiene varias capas de cerámica con dos salidas eléctricas, y para proteger la cerámica está recubierto de una carcasa metálica. En la figura 10 se ilustra una imagen del piezoeléctrico tipo pila.

Figura 10. Piezoeléctrico tipo pila



Fuente: tipo de cristales piezoeléctricos<sup>74</sup>

- **Tipo nanoposicionador flexure**

Este piezoeléctrico es muy utilizado en los laboratorios de investigación y en la industria para uso de verificaciones de unidades de disco, alineadores de pantalla para rayos X, escalonadores, óptica adaptativa, alineadores de fibra entre otros. En la figura 11 se muestra un piezoeléctrico nanoposicionador flexure.

Figura 11. Piezoeléctrico nanoposicionador flexure

<sup>74</sup> Tipo de cristales piezoeléctricos [online] [consultado el 15 de enero del 2021] disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Gerardo\\_Angulo-Cuentas/publication/321833041\\_GENERACION\\_DE\\_ENERGIA\\_ELECTRICA\\_MEDIANTE\\_EL\\_USO\\_DE\\_MATERIAL\\_PIEZOELECTRICO\\_2010-2017/links/5a33e6db45851532e82c94ce/GENERACION-DE-ENERGIA-ELECTRICA-MEDIANTE-EL-USO-DE-MATERIAL-PIEZOLECTRICO-2010-2017.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gerardo_Angulo-Cuentas/publication/321833041_GENERACION_DE_ENERGIA_ELECTRICA_MEDIANTE_EL_USO_DE_MATERIAL_PIEZOELECTRICO_2010-2017/links/5a33e6db45851532e82c94ce/GENERACION-DE-ENERGIA-ELECTRICA-MEDIANTE-EL-USO-DE-MATERIAL-PIEZOLECTRICO-2010-2017.pdf)



Fuente: tipo de cristales piezoeléctricos<sup>75</sup>

- **Piezoeléctrico combinado con posicionamiento motorizado**  
En algunos casos los piezoeléctricos son combinados con un tipo de actuadores para formar un sistema más complejo, en la figura 12 se muestra un piezoeléctrico con un tornillo motorizado de 25 mm de movimiento, conservando las características de alta resolución intrínsecas.

*Figura 12. Combinación de un piezoeléctrico y un tornillo motorizado*



Fuente: tipo de cristales piezoeléctricos<sup>76</sup>

### 1.6.2.5 Efecto Piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico es la utilización de una energía mecánica para la producción de energía eléctrica a través de ciertos cristales, existen 2 tipos de efectos piezoeléctricos los cuales son el efecto piezoeléctrico directo, el cual convierte una energía mecánica o tensión mecánica en energía eléctrica y el efecto inverso el cual

---

<sup>75</sup> *Ibíd.*, P. 10

<sup>76</sup> *Ibíd.*, P. 12

convierte energía eléctrica en energía mecánica, este es a través de la composición química de estos cristales.

### 1.6.2.6 Efecto Piezoeléctrico Directo

Este es uno de los usos más comunes de estos piezoeléctricos, ya que son capaces de producir energía eléctrica en sus terminales de salida, debido al cambio de distancia entre sus dipolos, lo cual produce cambios en la densidad de carga en los extremos y se produce la electricidad, es directamente proporcional la fuerza con la que se comprimen estos piezoeléctricos a la electricidad generada por ellos, en la figura 13 se muestra de manera gráfica su comportamiento.<sup>77</sup>

Figura 13. Efecto piezoeléctrico directo.



Fuente: Principios de Funcionamiento Piezoeléctrico<sup>78</sup>

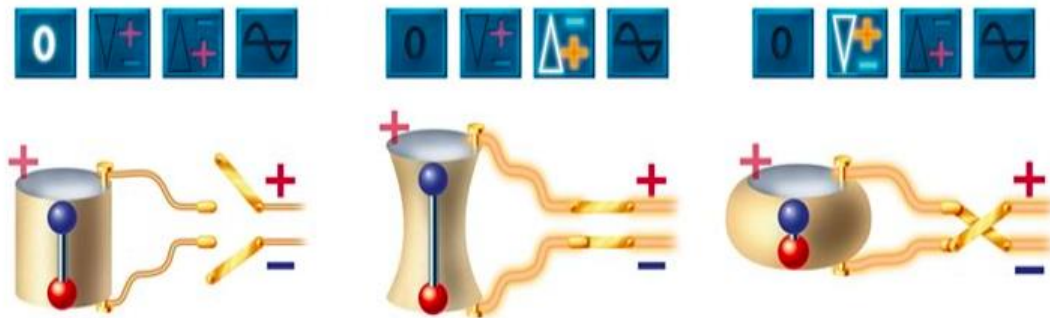
<sup>77</sup> Principios de Funcionamiento Piezoeléctrico [online] [consultado el 18 de febrero del 2021] Disponible en <https://www.ceramtec.es/materiales-ceramicos/piezoceramica/basicos/>

<sup>78</sup> *Ibíd.*, p. 12

### 1.6.2.7 Efecto Piezoeléctrico Indirecto

El efecto piezoeléctrico indirecto es cuando el sistema no produce energía a través de su movimiento, sino que se le transfiere electricidad lo que genera una deformación o un cambio de las dimensiones de este sistema, esto es debido a la densidad de la carga eléctrica aplicada, las cargas positivas generan una atracción entre los polos negativos y los dipolos, en la figura 14 se muestra gráficamente este comportamiento.

Figura 14. Efecto piezoeléctrico indirecto.



Fuente: Principios de Funcionamiento Piezoeléctrico<sup>79</sup>

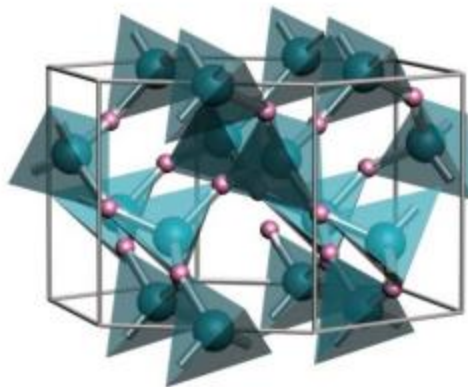
### 1.6.2.8 Cuarzo

Es un mineral compuesto químico, el cual consiste en una parte de silicio y dos partes de oxígeno, es un dióxido de silicio y su fórmula química es  $SiO_2$ , en la figura 15 se muestra su estructura cristalina, este mineral es uno de los más abundantes que se encuentra en la superficie del planeta tierra, gracias a su composición

<sup>79</sup> Principios de Funcionamiento Piezoeléctrico [online] [consultado el 18 de febrero del 2021] Disponible en <https://www.ceramtec.es/materiales-ceramicos/piezoceramica/basicos/>

química es uno de los minerales más útiles, ya que es utilizado en radio, televisión, radar y hasta en relojes de alta precisión.<sup>80</sup>

Figura 15. Estructura Cristalina del Cuarzo



Fuente: Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa<sup>81</sup>

### 1.6.2.9 Sal De Rochelle

También conocida como la sal Pierre Seignette, nombre de un farmacéutico de la Rochelle que la sintetizó en 1675, es una sal soluble en agua y muy ligeramente en alcohol, su principal aplicación son la piezoelectricidad, industria farmacéutica, tratamiento de metales, purificación del gas, entre otros, esta sal posee la propiedad

---

<sup>80</sup> Google Libros - The Edinburgh Journal of Science [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=dkQEAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=The+Edinburgh+Journal+of+Science&ots=NgasnGpRP9&sig=eBKqiHWIAEgIspSeWYb2JEhU9AM#v=onepage&q&f=false>.

<sup>81</sup> Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa [online] [consultado 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21498/1/Dise%C3%B1o%20en%20implementaci%C3%B3n%20de%20un%20generador%20piezoel%C3%A9ctrico%20baldosa%2C%20para%20alimentar%20un%20sistema%20de%20iluminaci%C3%B3n%20de%20baja%20potencia.pdf>



de doble retracción, su composición química es la de un tartrato de sodio y potasio.<sup>82</sup>  $KNa(C_4H_4O_6) \cdot 4H_2O$ . En la figura 16 se puede observar los cristales compuestos por sal de Rochelle.

Figura 16. Sal de Rochelle



Fuente: Sal de Rochelle<sup>83</sup>.

### 1.6.2.10 Turmalina

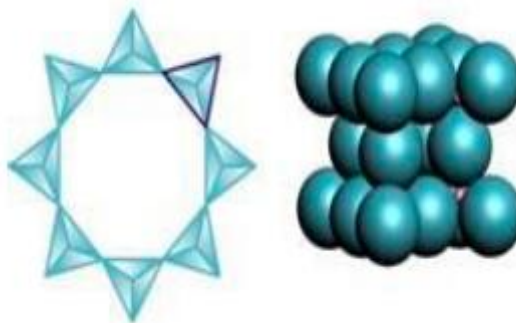
Este mineral se ha dado a conocer como “Gema del arco iris”, porque en ningún otro mineral se muestran esta cantidad de colores, en algunas ocasiones se pueden ver todos sobre esta piedra, contiene propiedades tanto de piroeléctrico como piezoeléctrico, para los dos casos, en sus extremos acumula cargas opuestas, en la figura 17 se muestra la estructura del ciclosilicatos.<sup>84</sup> Su composición química es  $(Na, Ca)(Al, Fe, Li)(Al, Mg, Mn)_6(BO_3)_3(Si_6O_{18}) \cdot (OH, F)_4$ .

<sup>82</sup> EcuRed - Sal de la Róchele [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en [https://www.ecured.cu/Sal\\_de\\_la\\_Rochelle](https://www.ecured.cu/Sal_de_la_Rochelle).

<sup>83</sup> Sal de Rochelle. [online] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en [https://www.askix.com/como-hacer-crecer-cristales-de-gran\\_8.html](https://www.askix.com/como-hacer-crecer-cristales-de-gran_8.html)

<sup>84</sup> EcuRed - Turmalina [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://www.ecured.cu/Turmalina>.

Figura 17. Estructura Ciclosilicatos



Fuente: Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa<sup>85</sup>

### 1.6.2.11 Topacio

Su nombre se deriva según Plinio el viejo, de la isla de topacios que se sitúa en el mar rojo, este se encuentra en rocas magmáticas consolidadas en la fase pegmatítico-neumatolítica, las variedades de este mineral se producen tan solo por el cambio de color, y esto se debe a la mayor o menor presencia del flúor, y al centro de colores creados por las radiaciones naturales, en la figura 18 se muestra una imagen de este mineral.<sup>86</sup> Este es un aluminosilicato su fórmula química es  $Al_2SiO_4(F OH)_2$ .

Figura 18. Topacio

<sup>85</sup> Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa [online] [consultado 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21498/1/Dise%C3%B1o%20en%20implementaci%C3%B3n%20de%20un%20generador%20piezoel%C3%A9ctrico%20baldosa%2C%20para%20alimentar%20un%20sistema%20de%20iluminaci%C3%B3n%20de%20baja%20potencia.pdf>

<sup>86</sup> EcuRed – Topacio [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://www.ecured.cu/Topacio#Usos>.



Fuente: que es el topacio<sup>87</sup>

### 1.6.2.12 Energía Eléctrica

Es la energía que se produce por el movimiento de protones y neutrones en el interior de los materiales conductores, esta energía se produce en centrales de energía primaria que en algunos casos pueden ser renovables, energía eólica, la radiación, la solar, y la producida por los océanos, por otro lado, están las energías no renovables, que son las producidas por centrales convencionales a base de combustibles fósiles como son el carbón, el gas natural y el petróleo.<sup>88</sup>

---

<sup>87</sup> que es el topacio [online] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://geologiaweb.com/minerales/topacio/>

<sup>88</sup> Endesa - Cómo se genera la energía eléctrica [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/energia-y-mas/como-se-genera-electricidad>.

### 1.6.2.13 Energía Mecánica

Son producidas por fuerzas mecánicas, en otras palabras, es la suma de la energía cinética y la energía potencial de un cuerpo o sistema, la energía cinética la obtienen los cuerpos simplemente con moverse de su punto de equilibrio, estas energías dependen de las velocidades y de sus masas y la energía potencial son las relacionadas con el trabajo de fuerza , estas energías se les otorga el nombre de conservativas ya que dependen de la masa de los cuerpos y de su posición.<sup>89</sup> A continuación se muestra la ecuación de la energía mecánica (7).

Ecuación 7. Energía mecánica.

(7)

$$E_{mec} = E_p + E_c$$

Donde:

- $E_{mec}$  = Energía mecánica ( $J$ ).
- $E_p$  = Energía potencial ( $J$ ).
- $E_c$  = Energía cinética ( $J$ ).

### 1.6.2.14 Energía Cinética

Esta energía es la que estudia los cuerpos en movimiento, ya que estos dependen de su masa y su velocidad, esto se representa en ( $J$ ), la masa en ( $m$ ), su unidad es el ( $Kg$ ), y la velocidad en ( $v$ ), y sus unidades con metros/segundos ( $m/s$ ).<sup>90</sup> A continuación se muestra la ecuación de la energía cinética (8).

Ecuación 8. Energía cinética.

(8)

---

<sup>89</sup> Raffino Maria Estela. Energía Mecánica - Concepto, tipos y ejemplos. 2020 [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://concepto.de/energia-mecanica/>.

<sup>90</sup> Miñarro Recio Joaquin - La energía cinética [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en [http://newton.cnice.mec.es/materiales\\_didacticos/energia/cinetica.html](http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/cinetica.html).

$$EC = \frac{1}{2} mv^2$$

Donde:

- $Ec$  = Energía cinética ( $J$ )
- $m$  = Masa ( $Kg$ )
- $v^2$  = Velocidad ( $\frac{m}{s}$ )

### 1.6.2.15 Energía Potencial

Es la energía que tiene un cuerpo en un punto, respecto al punto de referencia que es el nivel de la superficie de la tierra, se eleva un cuerpo o masa ( $m$ ) del punto de referencia hasta una altura ( $h$ ), este cuerpo obtendrá una energía potencial.<sup>91</sup> A continuación se muestra la ecuación de la energía potencial (9).

Ecuación 9. Energía potencial.

(9)

$$Ep = m \times g \times h$$

Donde,

$Ep$  = Energía potencial gravitatoria ( $J$ ).

$m$  = Masa ( $Kg$ )

$g$  = gravedad ( $9,81 m / s^2$ )

$h$  = Altura ( $m$ )

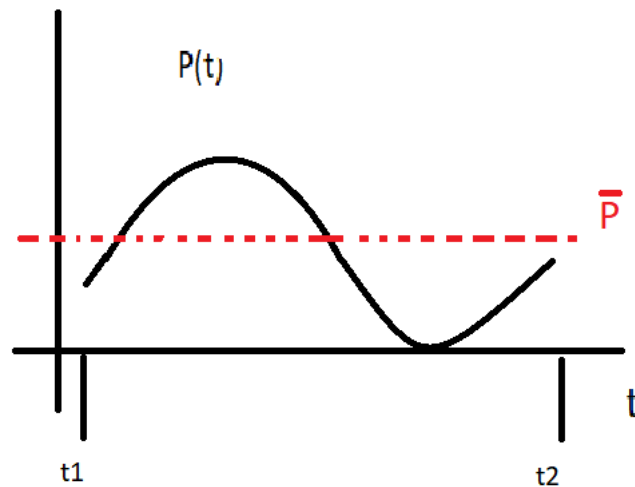
---

<sup>91</sup> SERRA REQUENA Bernat - Energía potencial. 2017 [sitio web] [consultado el 20 de enero del 2021]. Disponible en <https://www.universoformulas.com/fisica/dinamica/energia-potencial/>.

### 1.6.2.16 Potencia eléctrica

Es la velocidad con la que es consumida la energía, se considera potencia eléctrica la energía emitida o consumida por un dispositivo eléctrico, en una franja de tiempo o momento determinado, la potencia se mide en Watts<sup>92</sup>, en la figura 19 se muestra la potencia eléctrica de un circuito.

Figura 19. Potencia eléctrica

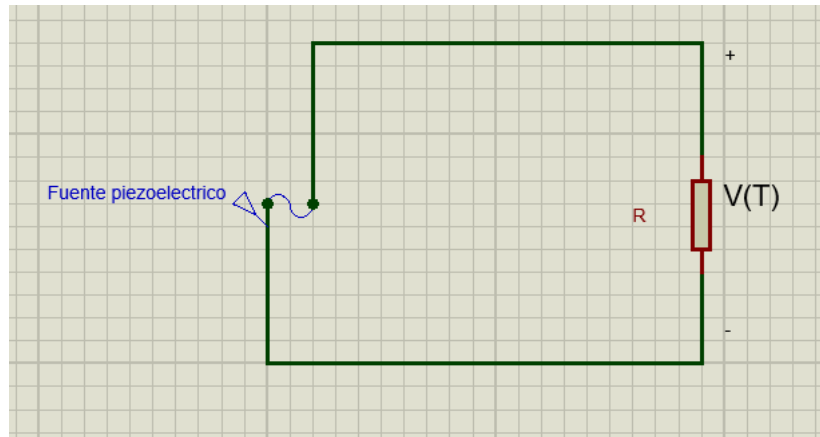


Fuente: el autor

En la figura 20 se muestra el sensor piezoeléctrico con la carga asignada.

Figura 20. Diagrama del sensor piezoeléctrico con la carga

<sup>92</sup> Que es la potencia eléctrica [sitio web] [consultado el 16 de mayo del 2021] disponible en [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke\\_potencia/ke\\_potencia\\_elect\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_potencia/ke_potencia_elect_1.htm)



Fuente: el autor

Para la potencia eléctrica con base a la figura anterior se presenta la ecuación 10, para poder calcularla.

Ecuación 10. Potencia eléctrica

(10)

$$P = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p(t) dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{V(t)^2}{R} dt}{t_2 - t_1}$$

Donde:

$p(t)$  = potencia instantánea (W)

$P$  = potencia promedio (W)

$t_2 - t_1$  = intervalo de tiempo ó duración de la prueba (s)

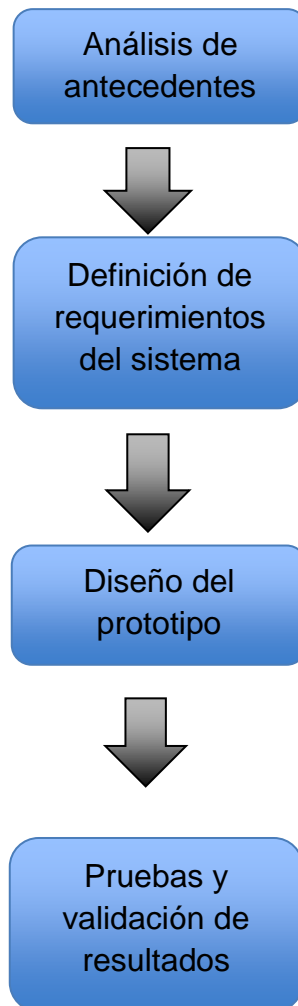
$v(t)$  = voltaje en la carga (v)

$R$  = resistencia

## 1.7 METODOLOGIA

En la siguiente imagen, Figura 21, se ilustra de manera gráfica los módulos para la metodología del estudio que se realizó, en el primer módulo se hace un análisis de los antecedentes, se continúa con el módulo de la definición de los requerimientos, con base a los antecedentes obtenidos, se procede con el módulo del diseño del sistema, y el análisis del sistema propuesto y teniendo esta información se hacen las conclusiones de todo el sistema.

*Figura 21. Diagrama de bloques de la metodología propuesta.*





Fuente: El autor

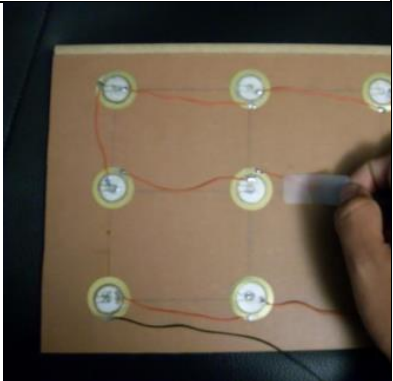
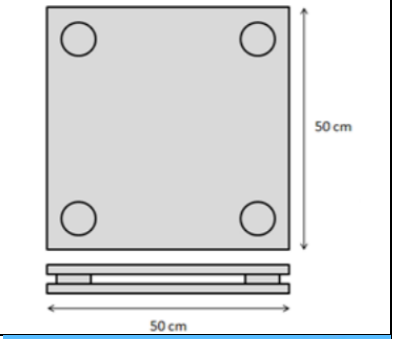
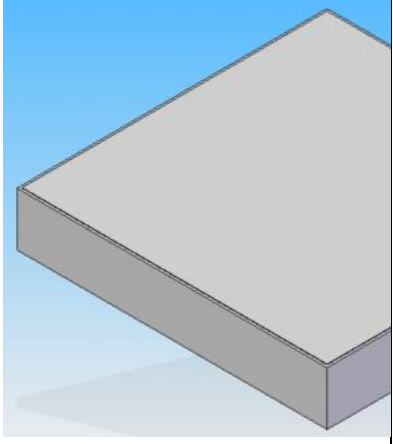


## 1.8 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Se analizó los antecedentes expuestos anteriormente se realiza la tabla identificando el nombre de la empresa que los fabrica, o nombre del prototipo propuesto por estudiantes, país de fabricación, se identifica el voltaje o potencia generada, su aplicación y la imagen del diseño expuesto. Tabla 2 se muestra el análisis de antecedentes expuestos.

Tabla 2. Análisis de antecedentes referenciados

Empresas o prototipos	Fabricación	Voltaje o potencia generada	Configuración	Aplicación	Imagen
Pavegen	Ingles	5w		Baldosa piezoeléctrica para la generación de electricidad	
diseño de un prototipo de baldosas inteligentes de alto tráfico para implementación en el sistema de transporte público	Colombia	Potencia promedio: 225mW	Sensores piezoeléctricos en paralelo	Baldosa piezoeléctrica para la generación de energía eléctrica	

Transmisión de la ciudad de Bogotá					
Piso generador de energía eléctrica	México	Potencia promedio: 2.175mw/s	Sensores piezoeléctricos en serie	Baldosa piezoeléctrica para la generación de energía eléctrica	
Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía	España	Potencia promedio 5mW	Sensores piezoeléctricos conectados en paralelo	Baldosa tipo sándwich para la generación de energía eléctrica	
baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético	Colombia	Potencia promedio 9,25mW	Sensores piezoeléctricos en paralelo	Baldosa de concreto con los elementos piezoeléctricos en la parte superior	

Fuente: el autor

## 1.9 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

En este capítulo se hizo una definición de los materiales usados en la implementación del prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de una baldosa con elementos piezoeléctricos, la selección de estos materiales se basa en los estudios encontrados en el mercado, de esta manera uno de los elementos fundamentales para este dispositivo son los piezoeléctricos, estos elementos son de fácil acceso, precios asequibles y eficientes en la generación de electricidad, estos se ensamblan dentro de una caja la cual tiene dimensiones muy parecidas a las de una baldosa común en el mercado, el material para la construcción de esta caja tiene que ser un material eficiente al alto tráfico de personas, alrededor de diez pisadas por minuto y resistente a la variación de las condiciones climáticas del lugar donde se requiera su instalación.

Uno de los requerimientos más importantes en la construcción de la baldosa, es que el circuito permita hacer las mediciones de voltajes correspondientes, para esto en la construcción de la tabla pcb se diseña de manera que permita hacer la instalación del arduino y así tomar los valores, para la construcción se debe ensamblar de manera que pueda dejar un costado sin la tapa, pero que esto no afecté su funcionamiento, para introducir los cables del arduino.

El circuito eléctrico de la baldosa se basa fundamentalmente en los sensores piezoeléctricos en conjunto con elementos que componen toda la instalación eléctrica los cuales son:

- ✓ 16 Sensores piezoeléctricos de 35mm
- ✓ 16 Rectificadores de onda completa
- ✓ 4 Condensadores
- ✓ 16 Diodos 1N4001
- ✓ Cable eléctrico para la conexión de los componentes

Para este proyecto se usó una caja tipo baldosa con las siguientes dimensiones: 40 cm de largo, por 40 cm de ancho, por 4.8 cm de alto. Esto con el fin de lograr ensamblar todos los elementos antes descritos, permitiendo que cada uno de ellos cuente con un espacio suficiente para su funcionamiento, adicionalmente como el propósito de este prototipo es la generación de electricidad, por esta razón se insertan el mayor número de sensores piezoeléctricos posibles.

Los criterios que se tienen en cuenta para la selección de los materiales, en la construcción de la caja tipo baldosa, son: materiales que sean asequibles comercialmente, de fácil adaptabilidad a lo que se quiere construir, que los costos no sean tan elevados y lo más importante que logren una buena efectividad con el objetivo, estos materiales son:

- ✓ 2 Láminas de madera de 8 mm de espesor
- ✓ 20 Tornillos para madera
- ✓ 4 Resortes
- ✓ 20 Chasos de madera

A continuación, se hace una descripción de cada uno de los elementos usados en el circuito para la baldosa generadora de electricidad con elementos piezoeléctricos.

### **1.9.1 Selección Del Sensor Piezoeléctrico**

En los antecedentes antes mencionados se muestra gran cantidad de información relevante para la fabricación del prototipo de una baldosa con sensores piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica, para esto los autores García, Gélvez y Torres<sup>93</sup> demostraron que el sensor piezoeléctrico que más genera energía eléctrica es el sensor con geometría circular

Para este prototipo tipo baldosa específicamente se selecciona un sensor piezoeléctrico de 35 mm de diámetro el cual es de tipo natural, en la figura 22 se muestra un sensor piezoeléctrico<sup>94</sup> convencional, para este proyecto se encontró en el mercado nacional un piezoeléctrico que cuenta con una carcasa protectora, como lo muestra la figura 23, que permite proteger el sensor de otros elementos y de esta manera alarga su vida útil.

*Figura 22. Sensor piezoeléctrico convencional*

---

<sup>93</sup> Piezoelectric transducer design for electric power generation Op. Cit. P. 3



Fuente: Sensor piezoeléctrico de 35mm<sup>95</sup>

- ✓ Frecuencia de resonancia(KHz)  $3.0 \pm 0.3$
- ✓ Impedancia resonante(O) =500
- ✓ Capacitancia a 1KHz(pF)  $25000 \pm 30\%$
- ✓ Diámetro de la placa de metal (mm) (D) (mm)  $f35.0 \pm 0.2$
- ✓ Diámetro de la placa de cerámica (mm) (d) (mm)  $f25.0 \pm 0.5$
- ✓ Espesor total (mm) (T) (mm)  $0.56 \pm 0.06$
- ✓ Espesor de la placa de metal (mm) (t) (mm)  $0.29 \pm 0.04$

*Figura 23. Sensor piezoeléctrico usado en el proyecto*



Fuente: elaboración propia

<sup>95</sup> Sensor piezoeléctrico de 35mm [online] [consultado 11 de abril del 2021]. Disponible en <https://naylampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/346-sensor-piezoelctrico-35mm.html>

### 1.9.2 Selección Del Rectificador De Onda Completa

Haciendo las validaciones pertinentes de los antecedentes se pueden evidenciar en los estudios realizados la necesidad de la instalación de un puente rectificador de onda completa a el circuito, ya que los sensores piezoeléctricos funcionan con corriente alterna, estos generan voltajes positivos (+) y voltajes negativos (-), la función del puente rectificador de onda es convertir la señal alterna producida por los sensores piezoeléctricas a una señal continua.

### 1.9.3 Selección De Los Condensadores

En el mercado colombiano existe una gran variedad de condensadores, que brindan funciones muy eficientes a varios usos, de esta manera es importante seleccionar un condensador que se acople a los requerimientos del prototipo funcional de la baldosa generadora de electricidad, en términos generales un condensador es un componente eléctrico que almacena carga eléctrica en forma de diferencia de potencial para liberarla posteriormente.<sup>96</sup>

### 1.9.4 Diodos

Como se mencionó anteriormente de identifica la necesidad de la instalación de diodos en el circuito con los sensores piezoeléctricos, de esta manera en la tabla 3 se muestra los posibles diodos a utilizar, para identificar mejor cual será el seleccionado.

*Tabla 3. Análisis de diodos para usar*

Diodos	Característica	Voltaje de funcionamiento	Uso
Diodo detector	Se caracteriza por tener una unión	0,6v a 0,7v	Diseñado para operar en

<sup>96</sup> Condensador eléctrico [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://www.areatecnologia.com/electricidad/condensador.html>

	PN muy diminuta		dispositivos de muy altas frecuencias y baja corriente
Diodo rectificador	Permite la transformación de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC)	0,7v	dispositivos semiconductores que solo conducen en polarización directa
Diodo Zener	se caracterizan por permitir el flujo de la corriente inversamente y por su capacidad de mantener un voltaje constante en sus terminales al polarizar inversamente	0.6 a 0.7 V.	se utilizan como reguladores de tensión o voltaje para determinadas tensiones y resistencias de carga
Diodo emisor de luz(LED)	convierte la energía eléctrica en energía lumínica	2v	consiste en un proceso de electroluminiscencia en el que los huecos y los electrones se recombinan para producir energía en forma de luz
Diodo Schottky	se caracterizan por tener una respuesta muy rápida	0,25v	Se usa para proteger los circuitos reguladores contra la aplicación accidental de polaridad invertida en la entrada

Fuente: el autor

Para el prototipo inicial se selecciona el diodo rectificador ya que como bien su nombre lo indica rectifica la señal, y se adapta a la necesidad del prototipo, adicionalmente es exequible económicamente para el autor. Para más exactitud se selecciona el Diodo 1n4007.

### **1.9.5 Selección Del Material De La Caja Tipo Baldosa**

Para la construcción de la caja tipo baldosa con sensores piezoeléctricos, es necesario disponer de un material resistente al peso de una persona, fácil de obtener, precio asequible para el autor, y que permita una fácil manejabilidad en la construcción de la caja, adicionalmente que la tapa superior cuente o se pueda forrar de un material antideslizante, esto con el fin de brindar un mayor índice de seguridad para el usuario.

Cumpliendo con los requerimientos expuestos anteriormente se selecciona como material de construcción de la caja la madera con un grosor de 8mm, para la tapa superior se forrará con un material antideslizante.

### **1.9.6 Resortes**

Para la construcción de la baldosa generadora de electricidad se usó resortes de compresión, estos resortes son característicos porque su longitud en reposo es superior a la longitud de trabajo<sup>97</sup>, el tipo de resorte más habitual es el cilíndrico, pero existen varios tipos como el resorte de compresión cónicos o con forma de barrilete. En la figura 24 se muestra un resorte cilíndrico que se usó en el prototipo.

*Figura 24. Resorte Cilíndrico*

---

<sup>97</sup> PEREZ GONZALEZ, Antonio. Resorte de compresión [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en [http://www.mecapedia.uji.es/resorte\\_de\\_compresion.htm](http://www.mecapedia.uji.es/resorte_de_compresion.htm)





Fuente: Resorte de compresión<sup>98</sup>

## DISEÑO DEL PROTOTIPO

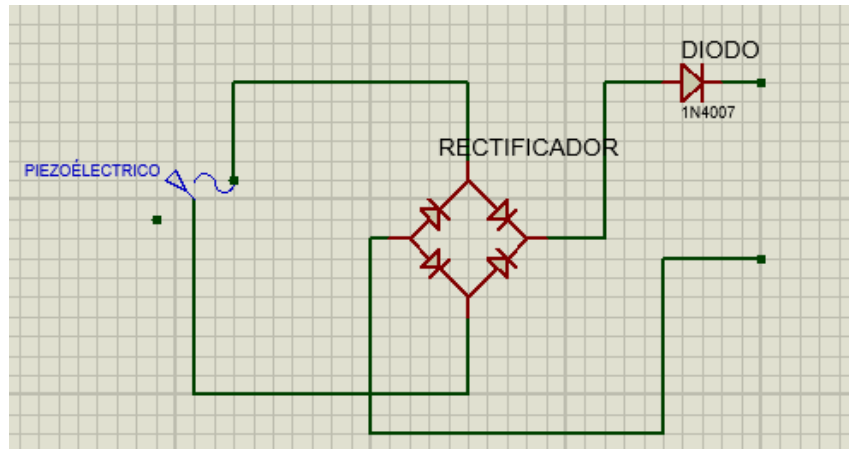
Para el diseño del prototipo funcional generadora de electricidad a través de una baldosa con elementos piezoeléctricos, es importante conocer las condiciones de operabilidad de los sensores o elementos piezoeléctricos, adicionalmente se aplican fundamentos teóricos encontrados en los antecedentes.

Con base a la información consultada, el autor del prototipo funcional de una baldosa generadora de energía eléctrica a través de los piezoeléctricos, propone hacer la conexión de cada piezoeléctrico conectado con un rectificador de onda completa y un diodo como se muestra en la figura 25.

*Figura 25. Conexión de los piezoeléctricos*

---

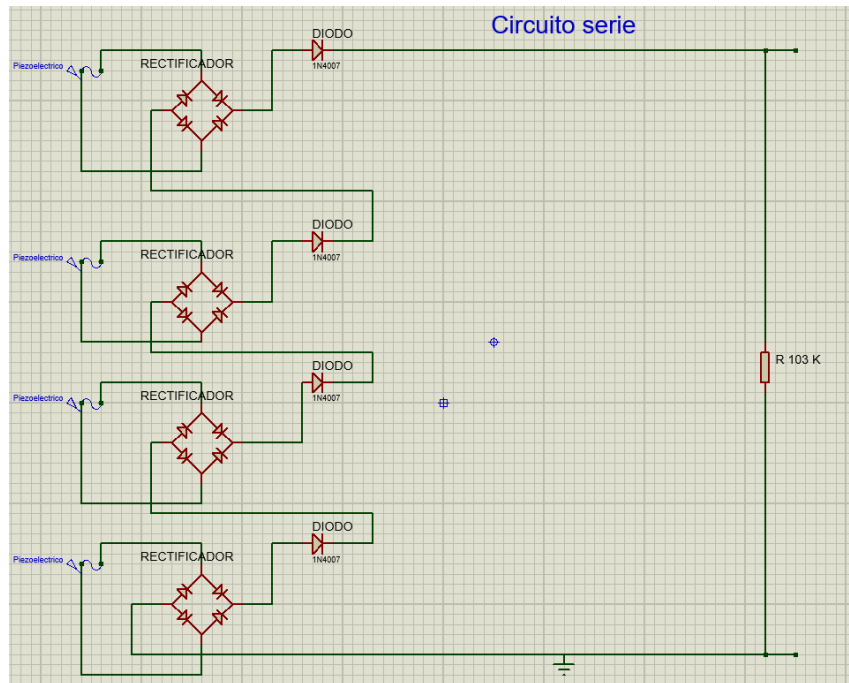
<sup>98</sup> PEREZ GONZALEZ, Antonio. Resorte de compresión [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en [http://www.mecapedia.uji.es/resorte\\_de\\_compresion.htm](http://www.mecapedia.uji.es/resorte_de_compresion.htm)



Fuente: el autor

En la figura 26 se muestra los cuatro sensores piezoeléctricos en uno de los extremos de la caja conectados en serie.

Figura 26. Ubicación de los sensores piezoeléctricos conectados en serie.

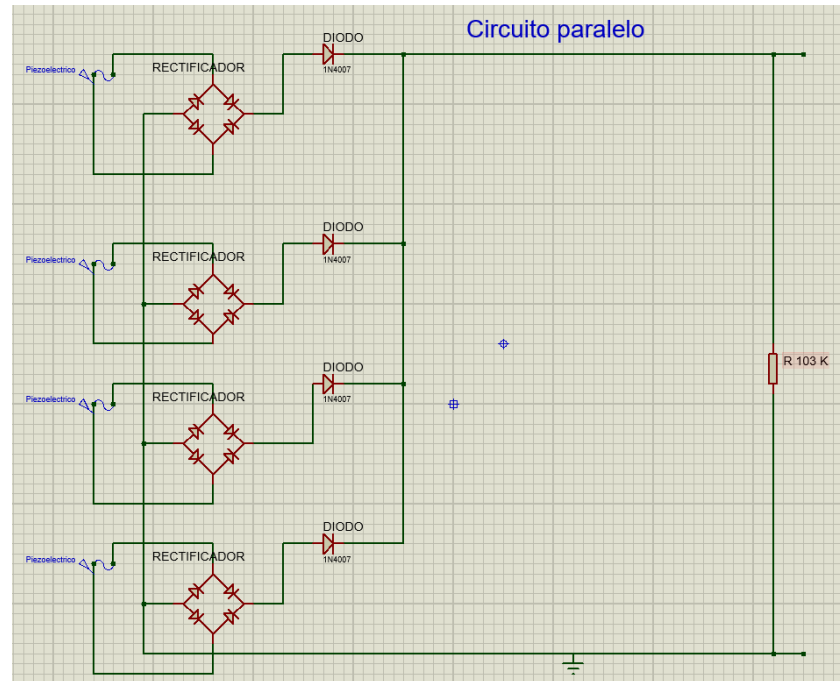


Fuente: el autor

En el diseño preliminar se hacen tres tipos de conexiones de los piezoeléctricos,

una conexión en serie y una conexión en paralelo y una conexión mixta, con esto lo que se busca es hacer las pruebas de funcionamiento y evidenciar que tipo de conexión es más conveniente para lograr una mayor producción de energía eléctrica. En la figura 27 se muestra una conexión en paralelo de los sensores piezoeléctricos.

Figura 27. Conexión de los sensores piezoeléctricos en paralelo.



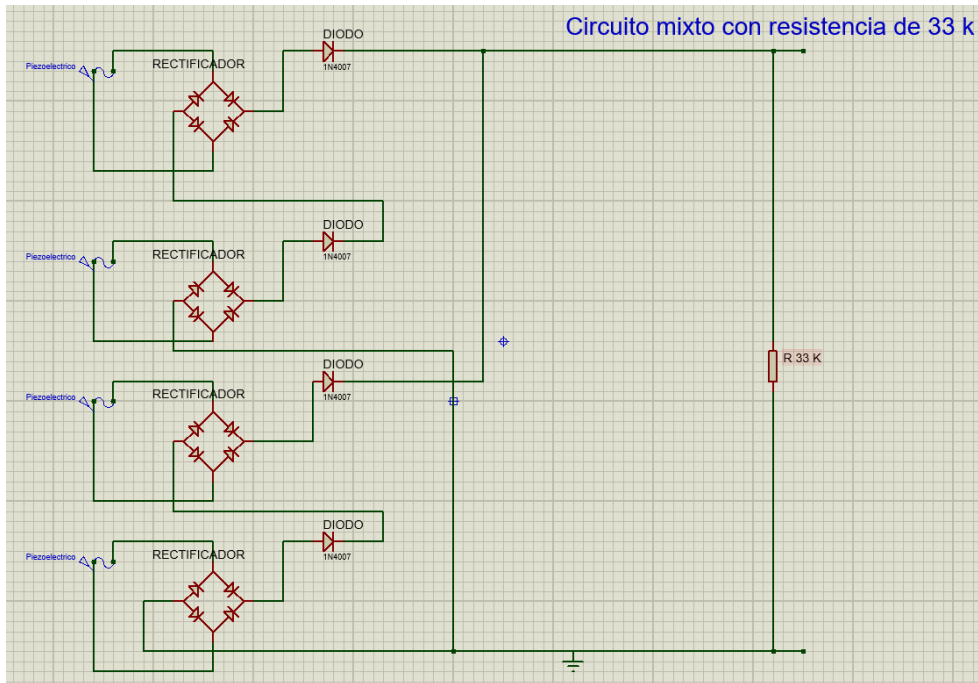
Fuente: el autor

Es importante resaltar que los sensores piezoeléctricos producen voltajes negativos y positivos<sup>99</sup>, con esto es necesario la instalación de un rectificador de onda completa, se implementa este rectificador de onda para eliminar los voltajes negativos<sup>100</sup>, de esta manera no hay posibilidad que los voltajes producidos se cancelen. En la figura 28 se muestra la tercera conexión mixta como se indica anteriormente es una conexión de dos sensores piezoeléctricos en serie y dos sensores en paralelo

Figura 28. circuito de conexión mixta

<sup>99</sup> Piezoelectricidad. Op. Cit. P. 5

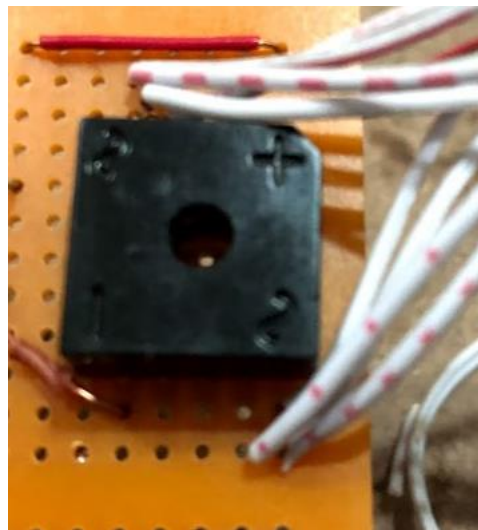
<sup>100</sup> Condensador eléctrico. Op. Cit. p. 4



Fuente: el autor

En el circuito propuesto se muestra la necesidad de la instalación de un rectificador de onda completa, en la figura 29 se muestra este rectificador de onda instalado al circuito.

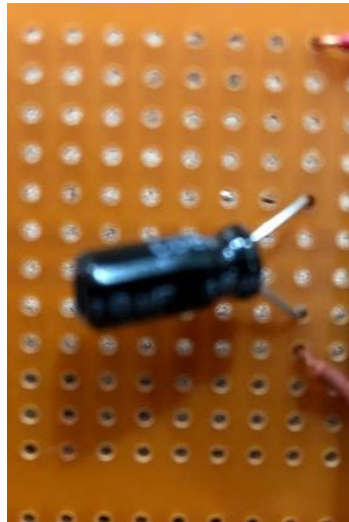
Figura 29. Rectificador de onda completa



Fuente: el autor

En el circuito se instaló un condensador, permitiendo que su funcionamiento sea más estable ya que este tiene la capacidad de almacenar electricidad a través de un campo eléctrico, a su vez cuenta con un tiempo de carga y descarga<sup>101</sup>, este se cargara con el voltaje producido por los sensores piezoeléctricos, en la figura 30 se muestra el condensador instalado al circuito eléctrico.

*Figura 30. Condensador instalado en el circuito eléctrico.*



Fuente: el autor

Un elemento fundamental en este prototipo son los resortes instalados dentro de la caja de la baldosa piezoeléctrica, el funcionamiento de estos resortes se basa en hacer que la tapa de la caja vuelva a su ubicación inicial, de esta manera permite que la baldosa esta lista para la siguiente pisada de un transeúnte.

Se instalan cuatro resortes cilíndricos de compresión, su ubico un resorte en cada extremo de la caja, haciendo posible un retorno armónico de la tapa de la caja, en la figura 31 se muestra la ubicación de los resortes de compresión.

---

<sup>101</sup> Condensador eléctrico. Op. Cit. p. 6

*Figura 31. Ubicación de los resortes de compresión.*



Fuente: el autor

## **PRUEBAS Y VALIDACION DE RESULTADOS**

El diseño del prototipo funcional de la baldosa generadora de energía eléctrica a través de elementos piezoeléctricos. Inicialmente se usa una caja de madera tipo baldosa como se especifica anteriormente, con unas medidas de alto de 4,8 cm, de largo 40cm y ancho de 40cm, estas medidas son exteriores. Se definieron estas medidas para lograr ensamblar todos los elementos mecánicos como eléctricos dentro de esta caja, la selección del material de la caja se hace basándose en el fácil manejo, fácil de trabajar y eficiente al momento de usarse<sup>102</sup>, en la figura 32 se muestra la elaboración de la caja para la baldosa piezoeléctrica.

*Figura 32. Elaboración de la caja para la baldosa piezoeléctrica*

---

<sup>102</sup> Área tecnológica Op. Cit. P. 4



Fuente: el autor

Para la estructura de la caja tipo baldosa se usa la madera como material único, ya que permite estructurar la caja de mejor manera, siendo un material renovable biodegradable y reciclable<sup>103</sup>, abundante, practico de trabajar, no es tan costoso en el mercado y logra un buen funcionamiento a la compresión de los piezoeléctricos, adicionalmente es un material que no es conductor eléctrico y esto incrementa los niveles de seguridad para los peatones. La composición química de la madera se basa mayormente en el hidrógeno, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno con cantidades menores de potasio, sodio, calcio, silicio y otros elementos.

Para este prototipito toda la caja está construida con madera como lo muestra la figura 33, esta caja fue construida por el autor.

*Figura 33. Construcción de la caja tipo baldosa*

---

<sup>103</sup> Área tecnología. La madera y las propiedades de la madera [sitio web] [consultado el 11 de abril del 2021] disponible en <https://www.areatecnologia.com/materiales/madera.html>



Fuente: el autor

Un factor importante con la implementación de la caja tipo baldosa es que la tapa posee unas pestañas que hacen la función de tope, adicionalmente este diseño no contiene bordes lo que permite un mejor funcionamiento al momento de transitar con cualquier tipo de silla de ruedas, patineta o bicicleta. La tapa de la caja tipo baldosa se construyó en madera con características resistentes, ya que en esta superficie los peatones con el movimiento de caminar accionaran el sistema de obtención de energía con los piezoeléctricos, adicionalmente se colocará un sistema de cinta adhesiva, que permite disminuir el riesgo de que una persona pueda resbalarse y sufrir algún tipo de accidente, teniendo como resultado una baldosa más segura para la ciudadanía. En la figura 34 se muestra la caja terminada.

*Figura 34. Resultado de la caja tipo baldosa*





Fuente: Elaboración Propia

Para la construcción de la caja, se implementaron unas pestañas de 0,5 cm que sirven como topes, que permiten que, con la fuerza aplicada de los resortes, esta se mantenga en su sitio, este estilo de pestañas son muy importantes ya que permiten que la tapa no cuente con altibajos en la zona donde se comprime la tapa, siendo una versión de caja segura para el transeúnte y cómoda para las personas con alguna discapacidad que requieren de una silla de ruedas para su movilidad, en la figura 35 se muestra la pestañas de la caja.

*Figura 35. Pestañas de la caja de la baldosa piezoeléctrica.*



Fuente: el autor

La tapa de la caja también cuenta con el sistema de pestañas de 0,5 cm, de esta manera la tapa y la caja se acoplan como topes, la caja como la tapa cuentan con pestañas en todos sus bordes, en la figura 36 se muestran pestañas de la tapa.

*Figura 36. Pestañas de la tapa de la caja de la baldosa piezoeléctrica.*



Fuente: el autor

Para la sección de los sensores piezoeléctricos, y con la ayuda de los antecedentes de la temática, se definió colocar cuatro piezoeléctricos de 35 mm cada uno, en cada extremo de la caja ya que con esta cantidad de piezoeléctricos la baldosa podría generar una mayor cantidad de energía eléctrica.

### **Circuito eléctrico**

Se hacen tres tipos de conexiones del circuito eléctrico para la baldosa generadora de energía eléctrica, se implementa una conexión de cuatro piezoeléctricos en serie, una conexión de cuatro piezoeléctricos en paralelo y una conexión mixta lo cual significa dos piezoeléctricos en serie y dos piezoeléctricos en paralelo. Donde a cada una de estas conexiones se toman valores de voltajes y se halla la potencia generada por este sistema.

#### **1.10 Patrón para la toma de datos de la prueba**

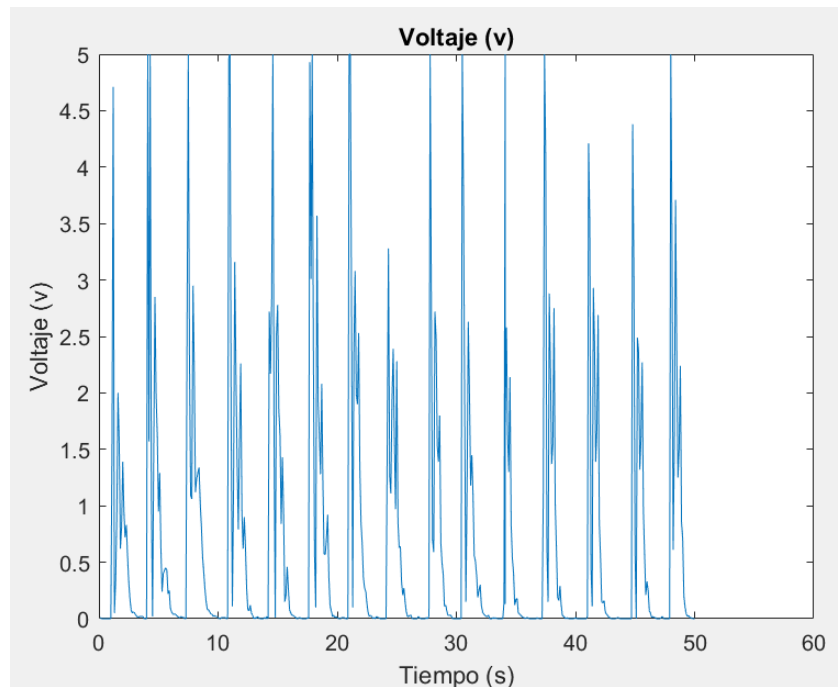
La prueba se basa en la instalación de los circuitos en la baldosa realizando varias configuraciones, esto con el fin de hacer las mediciones, el accionamiento de la baldosa la hace el autor con el pie, accionando para cada modelo de circuito y para cada resistencia, de esta manera se hace 15 impactos con el pie a la baldosa en 50

segundos, se hace la selección de este número de impactos en el tiempo establecido para que los pulsos no se solapen entre ellos, adicionalmente haciendo una manera fácil de ejecutar los impactos, para todos los escenarios se tuvo ese patrón y de esta manera se logró hacer las mediciones de voltajes y potencias respectivas, esto se usó para cada uno de las mediciones tomadas

### 1.11 Circuito serie con resistencia de $33k\Omega$

Teniendo en cuenta el circuito en serie propuesto en la figura 26 del diseño del prototipo se procede a la implementación y toma de datos de voltajes, con esta configuración se hace once distinta toma de datos, variando para cada uno de ellos el valor de R, para esta configuración solo se mostrara la figura 37 de voltajes producidos con resistencias de  $33K\Omega$  .

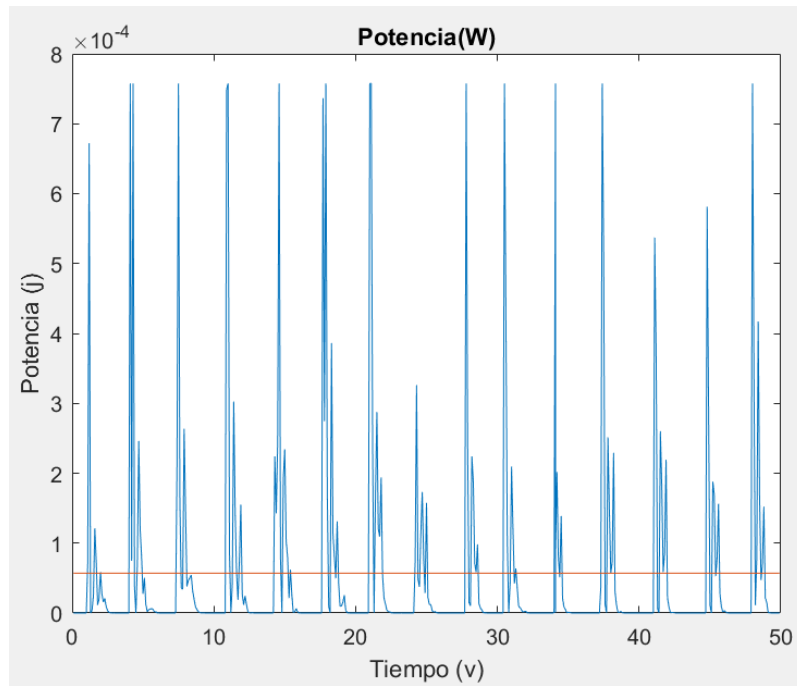
Figura 37. Voltaje para el circuito serie con resistencia de  $33K\Omega$



Fuente: el autor

Teniendo en cuenta los valores de voltajes producidos por los piezoeléctricos para esta conexión se halla el valor de potencia y se muestra en la figura 38.

Figura 38. Potencia generada por el circuito serie con resistencia  $33K\Omega$



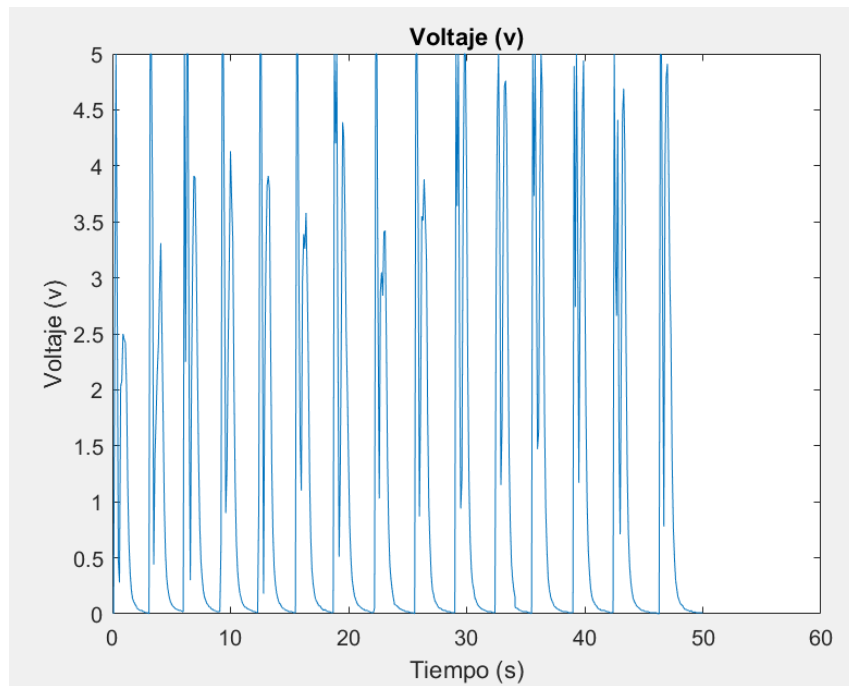
Fuente: el autor

Con ayuda del software Matlab se calcula la potencia promedio y su resultado es  $P_{rpom} = 5.7049 \times 10^{-05} W$

## 1.12 Circuito paralelo con resistencia de 33 K $\Omega$

Teniendo la cuenta la figura 27 mencionada en el diseño del prototipo, se procede hacer la implementación del sistema en paralelo, donde se instalan cuatro sensores piezoeléctricos y se mostraran once escenarios, en cada uno de ellos se cambiará el valor de la resistencia. Para este caso se mostrará la figura 39 con los valores de los voltajes obtenidos con la resistencia de 33K $\Omega$ .

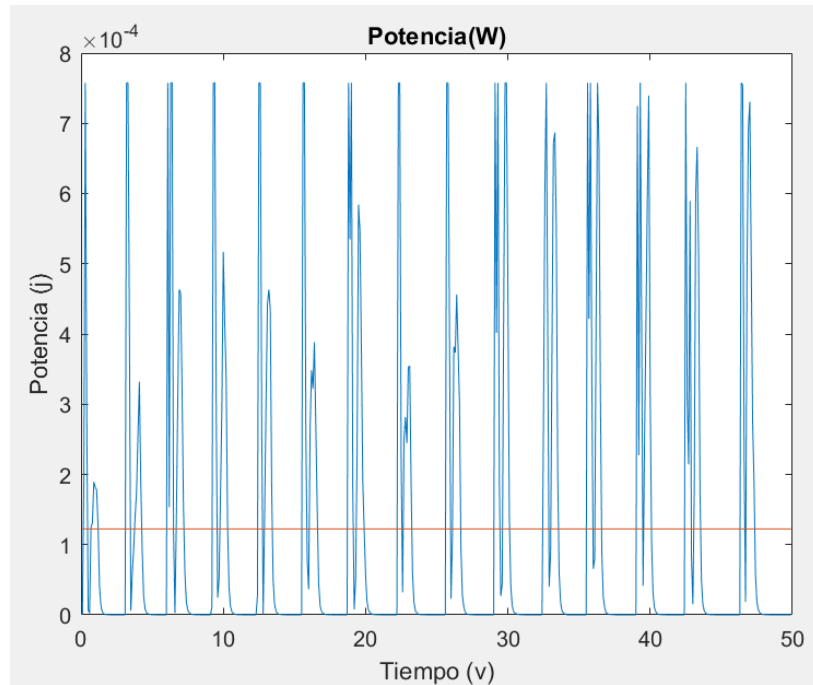
Figura 39. Voltajes obtenidos por el circuito paralelo con resistencia de 33K $\Omega$



Fuente: el autor

Con los voltajes obtenidos se procede hallar la potencia generada por el circuito como lo muestra la figura 40.

Figura 40. Potencia generada por el circuito paralelo con resistencia de 33K $\Omega$



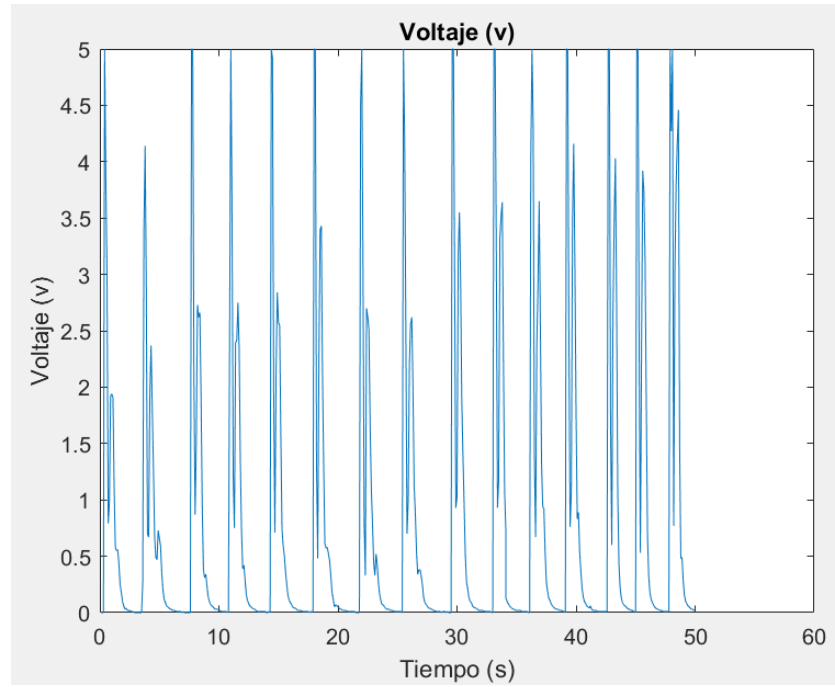
Fuente: el autor

Con ayuda del software Matlab se calcula la potencia promedio y su resultado es  $P_{prom} = 1.2238 \times 10^{-04} W$

### 1.13 Circuito mixto con resistencia de $33k\Omega$

Teniendo cuenta la figura 28, donde indica la conexión base de los sensores piezoeléctricos, se procede en la instalación de cuatro sensores con conexión mixta, lo que indica dos sensores en serie y dos sensores en paralelo, mostrando once escenarios diferentes, para cada uno de ellos variando el valor de la resistencia. La figura 41 muestra los voltajes obtenidos por esta configuración con resistencia de  $33K\Omega$ .

Figura 41. Voltajes obtenidos por el circuito mixto con resistencia de  $33K\Omega$

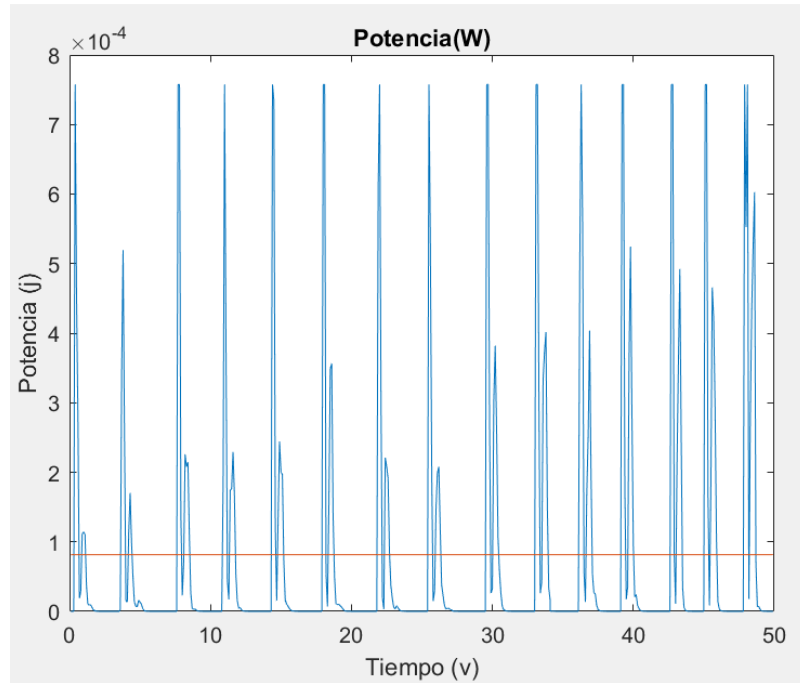


Fuente: el autor

Teniendo en cuenta los valores de los voltajes se procede hallar la potencia generada por el circuito mixto con resistencia de  $33K\Omega$  como lo muestra la figura 42.

Figura 42. Potencia generada por el circuito mixto con resistencia de  $33K\Omega$





Fuente: el autor

Con ayuda del software Matlab se calcula la potencia promedio y su resultado es  $P_{prom} = 8.1494 \times 10^{-05} W$

En la tabla 4. Se agrupa los valores de la potencia promedio obtenidos por cada una de las configuraciones establecidas, variando los valores de la resistencia

Tabla 4. Valores de potencia promedio de las configuraciones establecidas

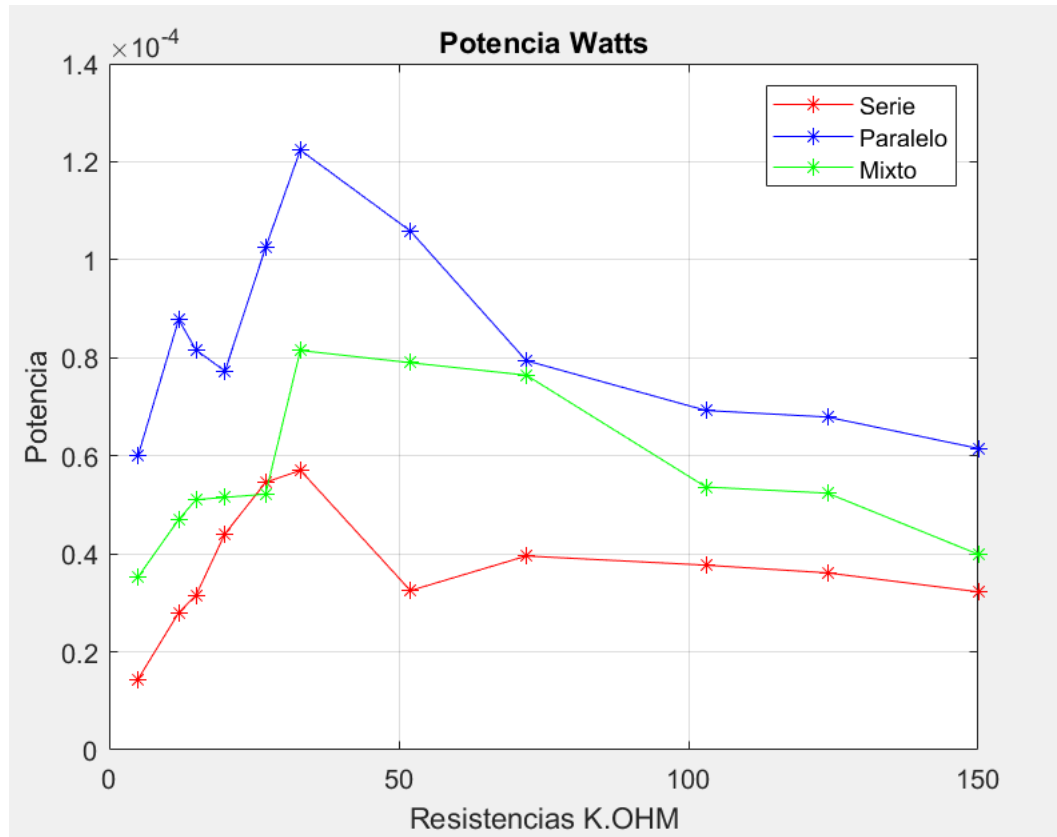
Resistencia	Circuito serie	Circuito paralelo	Circuito mixto
5.1k $\Omega$	$1.4431 \times 10^{-05} \text{ W}$	$6.0050 \times 10^{-05} \text{ W}$	$3.5293 \times 10^{-05} \text{ W}$
12K $\Omega$	$2.798 \times 10^{-05} \text{ W}$	$8.7799 \times 10^{-05} \text{ W}$	$4.6980 \times 10^{-05} \text{ W}$
15K $\Omega$	$3.1559 \times 10^{-05} \text{ W}$	$8.1585 \times 10^{-05} \text{ W}$	$5.1058 \times 10^{-05} \text{ W}$
20k $\Omega$	$4.4092 \times 10^{-05} \text{ W}$	$7.7277 \times 10^{-05} \text{ W}$	$5.1519 \times 10^{-05} \text{ W}$
27k $\Omega$	$5.4558 \times 10^{-05} \text{ W}$	$1.0246 \times 10^{-04} \text{ W}$	$5.2178 \times 10^{-05} \text{ W}$
33k $\Omega$	$5.8140 \times 10^{-05} \text{ W}$	$1.2238 \times 10^{-04} \text{ W}$	$8.1494 \times 10^{-05} \text{ W}$
52K $\Omega$	$3.2494 \times 10^{-05} \text{ W}$	$1.0585 \times 10^{-04} \text{ W}$	$7.8995 \times 10^{-05} \text{ W}$
72K $\Omega$	$3.9564 \times 10^{-05} \text{ W}$	$7.9423 \times 10^{-05} \text{ W}$	$7.6452 \times 10^{-05} \text{ W}$
103K $\Omega$	$3.7691 \times 10^{-05} \text{ W}$	$7.9423 \times 10^{-05} \text{ W}$	$5.3636 \times 10^{-05} \text{ W}$
124 K $\Omega$	$3.6112 \times 10^{-05} \text{ W}$	$6.7910 \times 10^{-05} \text{ W}$	$5.2378 \times 10^{-05} \text{ W}$
150K $\Omega$	$3.2250 \times 10^{-05} \text{ W}$	$6.1507 \times 10^{-05} \text{ W}$	$3.9903 \times 10^{-05} \text{ W}$

Fuente: el autor

## Validación de resultados

Tomando cada uno de los resultados obtenidos por las diferentes configuraciones de los circuitos series, paralelo y mixto, variando para cada uno de ellos los valores de la resistencia se obtiene la figura 43, donde se muestran los valores para cada una de las resistencias

Figura 43. Potencias promedio generadas por las conexiones



Fuente: el autor

En la figura 43 se evidencia que la configuración del circuito que más contribuye con la generación de potencia es la conexión en paralelo ya que comparándola con la configuración en serie o mixto, es la que produce mayores índices de potencia.

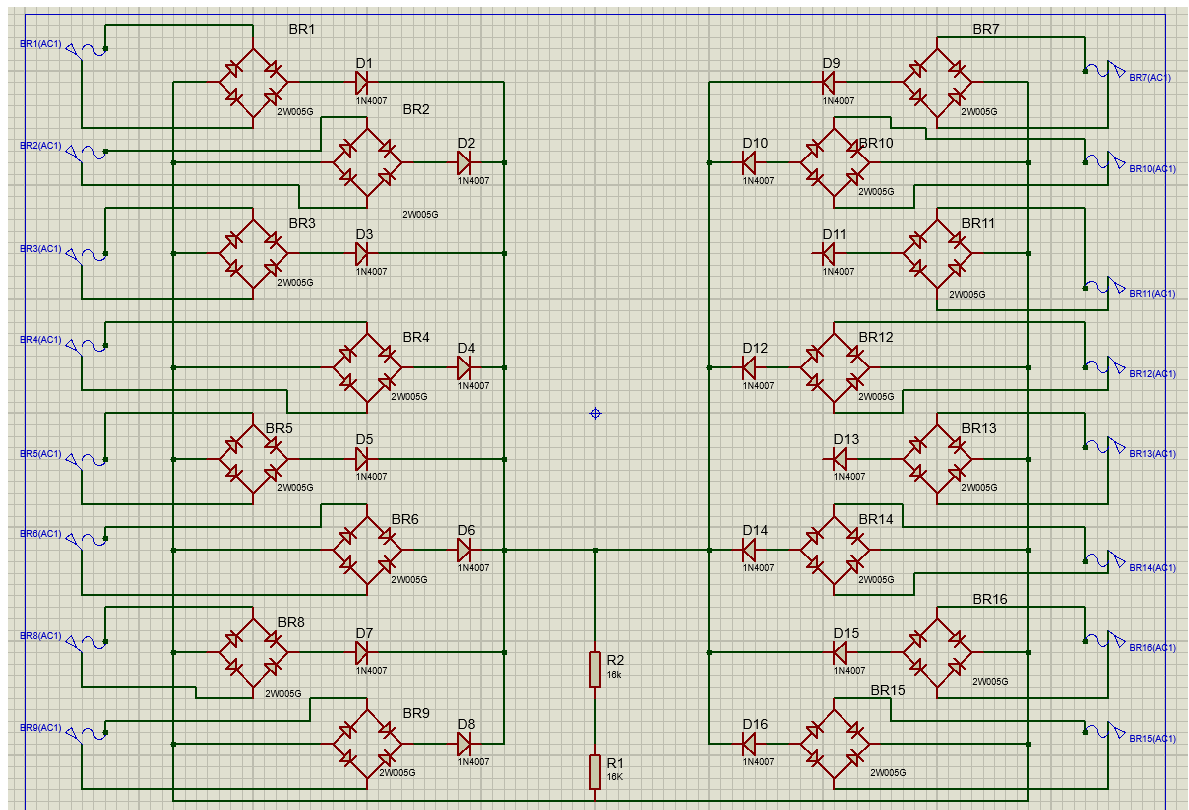
En la figura anteriormente mostrada se evidencia que las conexiones serie y mixta son las que menos generan potencia promedio, esto se debe a que los piezoeléctricos generan voltajes positivos y negativos, es muy poco probable que todos los piezoeléctricos generen voltaje positivo en el mismo instante, de esta manera se produce restas con cancelaciones de voltajes.

Para este prototipo la conexión que menos favorece a la generación de potencia, es la conexión en serie, ya como se evidencia en la figura 43, es la que tiene valores inferiores en comparación con la conexión mixta y conexión en paralelo.

Para el prototipo se hicieron mediciones en cada una de las configuraciones con resistencias de  $5.1\text{K}\Omega$ ,  $12\text{K}\Omega$ ,  $15\text{K}\Omega$ ,  $20\text{K}\Omega$ ,  $27\text{K}\Omega$ ,  $33\text{K}\Omega$ ,  $52\text{K}\Omega$ ,  $72\text{K}\Omega$ ,  $103\text{K}\Omega$ ,  $124\text{K}\Omega$ , y  $150\text{K}\Omega$ . Donde la resistencia que permite el mayor índice de transferencia es la resistencia de  $33\text{K}\Omega$  como se muestra en la figura 43.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por circuitos establecidos, para la construcción del prototipo se instalará el circuito en paralelo con resistencias de  $33\text{K}$  ya que como lo muestra la tabla 4 es la más eficiente a la producción de energía eléctrica. En la figura 44 se muestra el circuito final con la información obtenida por las pruebas realizadas.

Figura 44. Figura del circuito final para el prototipo

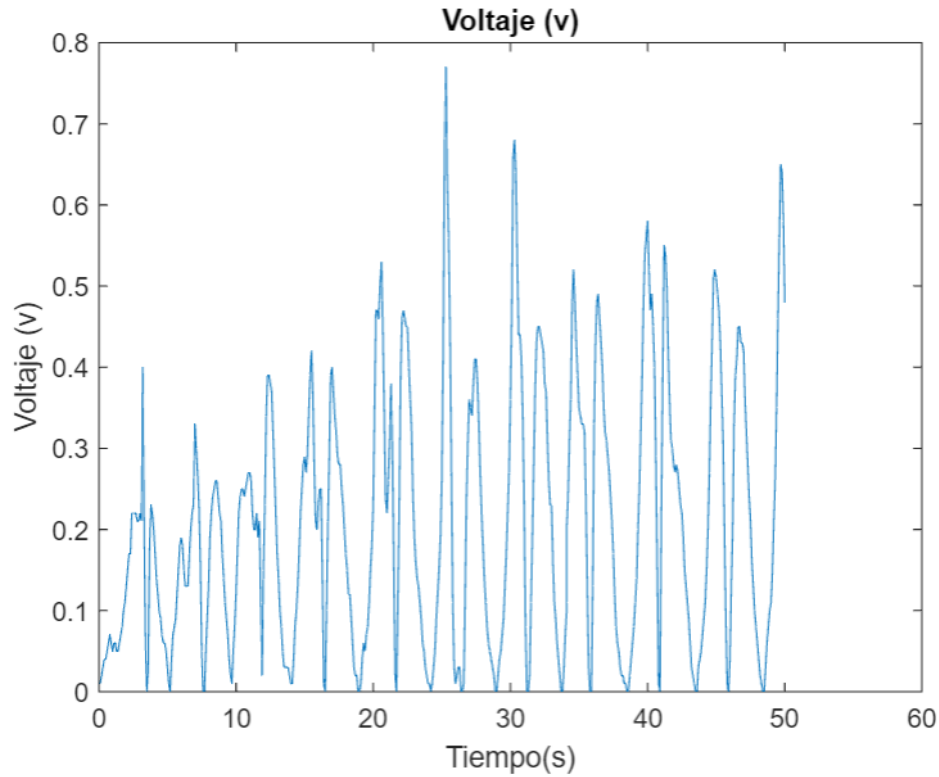


Fuente: el autor

en la figura 44 se muestra la conexión final del prototipo, para este caso se colocan dos resistencias de  $16\text{K}\Omega$  en serie, para que los valores de los voltajes no sean tan altos ya que las mediciones se harán con arduino y este solo soporta 5 voltios. En

la figura 45 se muestra la gráfica de los voltajes obtenidos.

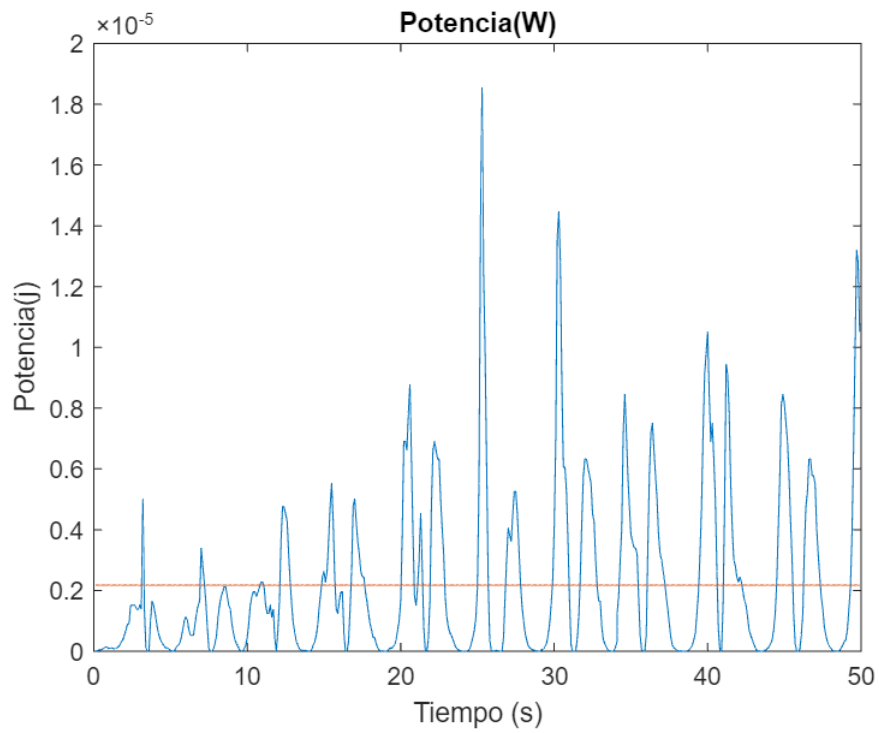
*Figura 45. Voltajes obtenidos por lo piezoeléctricas en la conexión final*



Fuente: el autor

En la figura 46 se presenta los valores de la potencia promedio generada por el circuito final, la potencia promedio se ve disminuida por las resistencias en serie que fueron instaladas para que no genere valores tan altos, y así poder ser medidos por el arduino.

*Figura 46. Potencia generada por el circuito en paralelo*



Fuente: el autor

Potencia promedio generada

*potencia promedio generada  $2.1227 \times 10^{-6} W$*

## DESCRPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

Tabla 5. Descripción económica del proyecto.

<b>PRESUPUESTO GLOBAL DEL PROYECTO</b>		
	<b>INGRESO S COP</b>	<b>EGRESO S COP</b>
<b>Ingresos</b>		
Auxilio o patrocinio para la elaboración del trabajo.	\$ 0	
Recurso propio (s)	\$ 900.000	
<b>Egresos</b>		
Recurso Humano Honorarios y servicios personales		\$ 0
Sensores piezoeléctricos		\$ 48.000
Componentes para el circuito		\$ 36.400
Viajes (transporte)		\$ 30.000
Madera		\$ 45.000
Aspírales o resortes		\$ 30.000
<b>Totales</b>	<b>\$900.000</b>	<b>\$ 189.400</b>

## CONCLUSIONES

En este proyecto el objetivo inicial es entender el funcionamiento de los piezoeléctricos para con esta información poder diseñar e implementar un sistema que es capaz de generar energía eléctrica de esta manera disminuir el uso de la fuente de energía eléctrica convencionales ya que estas consumen combustibles fósiles y a su vez contaminan el medio ambiente

En la actualidad existen varios métodos para la generación de energía eléctrica, como son los paneles solares, la producción energía eólica entre otros, este prototipo aprovecha el movimiento rutinario del caminar de las personas para transformarlos en energía eléctrica, lo que es positivo para el ser humano, mientras camina se ejercita y a su vez esta genera energía eléctrica limpia que podría usarse en cualquier dispositivo eléctrico de bajo consumo.

Los índices de eficiencia de estos sistemas de generación de energía eléctrica a través de elementos piezoeléctricos son directamente proporcionales a su accionamiento, por esta razón se recomienda la instalación de estos dispositivos en lugares con gran afluencia de personas o transeúntes.

Se realizó un análisis de la información encontrada en las bases de datos de la Universidad Católica de Colombia, y en diferentes fuentes, esto con el fin de lograr un mejor entendimiento de la tecnología, y saber a grandes rasgos los avances que ha tenido el uso de los sensores piezoeléctricos para la generación de electricidad, recopilando toda esta información se concluye que el uso de sensores piezoeléctricos en las baldosas es viable para la generación de energía eléctrica aprovechando la fuerza que hace el ser humano al momento de caminar.

En el desarrollo de este prototipo se evidencia que los sensores piezoeléctricos generan voltajes positivos y negativos ya que es muy poco probable que todos los sensores generen voltajes positivos al mismo tiempo y esto producirá la cancelación



de voltajes positivos con voltajes negativos, teniendo esta información es necesario la instalación de un puente rectificador de onda completa y un diodo, ya que esto transforma los voltajes negativos a positivos, de esta manera el circuito se convierte a un circuito más eficiente, y se reduce las pérdidas de voltaje.

Para el diseño inicial del prototipo se propuso usar cuatro piezoeléctricos, instalándolos en tres diferentes configuraciones, una conexión en serie, una conexión en paralelo y una conexión mixta, lo que indica dos sensores piezoeléctricos en serie y dos en paralelo. Se hizo estos tres tipos de conexiones con el fin de identificar la más óptima para la generación de energía eléctrica.

Para cada una de las conexiones descritas se procede hacer la variación de las resistencias tomando datos tales como  $5.1K\Omega$ ,  $12K\Omega$ ,  $15K\Omega$ ,  $20K\Omega$ ,  $27K\Omega$ ,  $33K\Omega$ ,  $52K\Omega$ ,  $72K\Omega$ ,  $103K\Omega$ ,  $124K\Omega$ , y  $150K\Omega$ , para identificar el valor de la resistencia que permite un mejor índice de transferencia de energía eléctrica y con esto se concluyó que la configuración que más genera electricidad es la conexión en paralelo, con la resistencia de  $33 K\Omega$ .

La toma de datos se realizó accionando la baldosa con los sensores piezoeléctricos, el autor ejecuto la baldosa con el pie, dando 15 impactos en 50 segundos, este patrón se basó en todas las pruebas realizadas, estos datos fueron almacenados y procesados para evidenciar el índice de potencia generada.

Esta baldosa como prototipo funcional realizada en la Universidad Católica de Colombia, es una base fundamental para trabajos futuros de los estudiantes, ya que, si cada vez la humanidad incrementa su interés por este tipo de sistemas, esto contribuye a la disminución de los índices de contaminación ambiental en el mundo.

## TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros se propone implementar el sistema he integrarlo con una batería, para lograr almacenar la energía eléctrica producida por este prototipo y posteriormente ser consumida en un dispositivo electrónico.

Para mejorar la producción de energía de este prototipo se podría construir he instalar varias baldosas con sensores piezoeléctricos en un lugar con gran afluencia de personas, así poder evidenciar la efectividad de este sistema con un mayor número de baldosas.

Se propone como trabajo futuro hacer la implementación del prototipo tipo baldosa con diodos schottky, ya que el voltaje de funcionamiento oscila en los 0,2v a 0,4v de esta manera el voltaje producido por las baldosas con elementos piezoeléctricos se elevaría, y así mismo los niveles de potencia serían mayores.

Se plantea hacer el estudio de esta baldosa en lugares donde puede logran una gran cantidad de afluencia de personas como lo podría hacer el futuro metro de Bogotá, donde estas baldosas podrían alimentar los dispositivos de iluminación del lugar.

Se propone implementar el prototipo he incrementar el número de sensores piezoeléctricos, haciendo las mediciones correspondientes para saber si al incrementar el número de los piezoeléctricos incrementaría la producción de la potencia generada.

## BIBLIOGRAFIA

- ABASI, A. (2013). Application of Piezoelectric Materials and Piezoelectric Network for Smart Roads. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 3(6), 857–862. <https://doi.org/10.11591/ijece.v3i6.4588>
- AGATÓN, F. (n.d.). *ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UTILIZAR BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA*. Retrieved March 26, 2021, from <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12025/articuloV0.0.0.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ALI, A., NG, M., & WANG, G. (2020). *UBC Bookstore Plastic Bag Alternative*.
- ANDRES FELIPE JARAMILLO, MAYKER GUILLERMO LÓPEZ, & KELLY JOHANA MUÑOZ. (2018). *DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE BALDOSAS INTELIGENTES DE ALTO TRÁFICO PARA IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO TRANSMILENIO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ*. <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00004335.pdf>
- Área tecnología. (n.d.). *La Madera y Propiedades de la Madera*. Retrieved April 11, 2021, from <https://www.areatecnologia.com/materiales/madera.html>
- Área Tecnológica. (n.d.). *Condensador Que es, Funcionamiento, Códigos, Conexiones y Tipos de Condensadores*. Retrieved April 11, 2021, from <https://www.areatecnologia.com/electricidad/condensador.html>
- ARIZAGA BARRAGÁN, A., & GONZÁLEZ PÉREZ, M. (2018). *Movilidad y piezoelectricidad: un estudio de la línea 2 del tren eléctrico de Guadalajara, México* *Mobility y piezoelectricity: a study of line 2 of the fast train of Guadalajara, Mexico*. 9, 51–62. <https://doi.org/10.14483/2248762X.14658>
- ARMIJOS QUICHIMBO, C. J. (2013). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA Área De La Energía, Las Industrias Y Los Recursos Naturales No Renovables CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA Diseño y construcción de un generador eléctrico de desplazamiento lineal con imanes permanentes para acoplamiento*. Universidad Nacional de Loja.
- Brewster, D. (1824). Observations of the pyro-electricity of minerals. *The Edinburgh Journal of Science*, 1, 208–215. <http://books.google.de/books?id=dkQEAAAAYAAJ&pg=PA208>

- CALIDAD DEL AIRE - IDEAM.* (n.d.). Retrieved February 7, 2021, from <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>
- CASTELLANOS, N. (2013). Evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico para generación de energía. *INVENTUM*, 8(15), 35–40. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.8.15.2013.35-40>
- CHEW, C., LOO, H. S., BOHARI, I. A., HAMID, R., SUKRI, H., & KUSUMARWADANI, R. (2017). *Feasibility of piezoelectric tiles adoption: A case study at Kuala Lumpur International Airport (KLIA) Malaysia. 1818, 20009.* <https://doi.org/10.1063/1.4976873>
- Cómo se genera la energía eléctrica | Endesa.* (n.d.). Retrieved February 8, 2021, from <https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/energia-y-mas/como-se-genera-electricidad>
- CUSTOMMEDIA. (2010). *¿Qué significa energía limpia? - ¿Sabías que? - Compromiso RSE.* <https://www.compromisorse.com/sabias-que/2010/03/30/que-significa-energia-limpia/>
- EDINBURGU BLACKWOOD, Willian; LONDON, C. T. (n.d.). *The Edinburgh Journal of Science - Google Libros* (Vol. 1). Retrieved February 8, 2021, from <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=dkQEAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=The+Edinburgh+Journal+of+Science&ots=NgasnGpRP9&sig=eBKqiHWIAEgIspSeWYb2JEhU9AM#v=onepage&q=The+Edinburgh+Journal+of+Science&f=false>
- Eficiencia Energética .* (n.d.). Retrieved March 24, 2021, from [https://www.camara.es/sites/default/files/generico/steep\\_training\\_material\\_for\\_smes\\_spanish\\_0.pdf](https://www.camara.es/sites/default/files/generico/steep_training_material_for_smes_spanish_0.pdf)
- Eficiencia energética, fuente de competitividad para la empresa | Cámara de España.* (2017, April 5). <https://www.camara.es/blog/innovacion-y-competitividad/eficiencia-energetica-fuente-de-competitividad-para-la-empresa>
- El clima mundial: entre 2015 y 2019 se ha acelerado el cambio climático | Organización Meteorológica Mundial.* (n.d.). Retrieved February 7, 2021, from <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-clima-mundial-entre-2015-y-2019-se-ha-acelerado-el-cambio-climatico>
- MONTES Felipe, L. (2013). *BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA ALIMENTAR SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO JORGE ANDRÉS CIFUENTES GUTIÉRREZ ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA INGENIERÍA MECATRÓNICA ENVIGADO 2013 BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA ALIMENTAR SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO*

*ENERGÉTICO JORGE ANDRÉS CIFUENTES GUTIÉRREZ Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecatrónico ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA INGENIERÍA MECATRÓNICA ENVIGADO 2013 CONTENIDO.*

- FERNÁNDEZ GALEANO, A. E. (2018). *Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza*.  
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández - Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández_-_Estudio_de_sensores_piezoeléctricos_en_aplicaciones_de_medición_de_fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- FORERO GARCÍA, E. F., GÉLVEZ LIZARAZO, Ó. M., & TORRES PINZÓN, C. A. (2019). "Piezoelectric transducer design for electric power generation Piezoelectric transducer design for electric power generation Diseño de transductor piezoeléctrico para generación de potencia eléctrica. *Rev. UIS Ing*, 18(1), 119–126.  
<https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019010>
- GARCÍA BORDA, Javier Oscar; MENDOZA VALERO, L. C. (n.d.). *MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO*.
- Global Energy Review 2020 – Analysis - IEA*. (2020, April).  
<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>
- Grealtec. (2014, November 28). *Todo lo que necesitas saber sobre las tiras LED | Grealtec*.  
<http://www.grealtec.com/blog/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-las-tiras-led/>
- HENDERSON Tessa. (2009, August 4). *Energy harvesting roads in Israel | Off Grid Energy Independence*.  
<https://www.offgridenergyindependence.com/articles/1589/energy-harvesting-roads-in-israel>
- HENDERSON, T. (2009, August 4). *Energy harvesting roads in Israel | Off Grid Energy Independence*. <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/1589/energy-harvesting-roads-in-israel>
- Índice de Calidad del Aire | Embajada de EE.UU. en Colombia*. (n.d.). Retrieved February 8, 2021, from <https://co.usembassy.gov/es/embassy-es/bogota-es/air-quality-index-es/>
- Informe Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia*. (n.d.). Retrieved February 9, 2021, from <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/Informe-Carga-de-Enfermedad-Ambiental-en-Colombia.aspx>
- Instituto Catalán de Energía. (n.d.). *Las centrales térmicas convencionales*. . Retrieved March 24, 2021, from [http://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/centrals\\_convencionals/](http://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/centrals_convencionals/)

*Jacques Curie* — Google Arts & Culture. (n.d.). Retrieved February 12, 2021, from <https://artsandculture.google.com/entity/jacques-curie/m0ggv6w?hl=es>

JARAMILLO, A. F. L. M. G. M. K. J. (2018). *DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE BALDOSAS INTELIGENTES DE ALTO TRÁFICO PARA IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO TRANSMILENIO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ* [UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA]. <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00004335.pdf>

JIMÉNEZ MARTINEZ, F. J., DE FRUTOS, J., & VÁZQUEZ, M. (2015). Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54(6), 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.09.001>

KATZIR, S. (2007). THE DISCOVERY OF THE PIEZOELECTRIC EFFECT. In *THE BEGINNINGS OF PIEZOELECTRICITY* (pp. 15–64). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4670-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4670-4_2)

Latina, A. (2012). *La Calidad del Aire en Producido por el Clean Air Institute*.

*Lineas de investigación - labquimac - Grupo de Investigación de Química Macromolecular - UPV/EHU*. (n.d.). Retrieved February 12, 2021, from <https://www.ehu.eus/es/web/labquimac/ikerkuntza-lerroak->

MALMCROMA.Martín, A., Tutor, M., Javier, D., & Cuadros, U. (2017). *Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales*.

MASANA GARCÍA, M. M. de G. et al. (2013). *Manual para la evaluación de riesgos originados por Fenómenos Naturales* [centro nacional de estimación y prevención y reducción del riesgo y desastres CENEPRED]. <http://bvpad.indec.gov.pe/doc/pdf/esp/doc2460/doc2460-contenido.pdf>

Ministerio de ciencia e innovación. (2010). Materiales piezoeléctricos. *Vigilancia Tecnológica*, 3.

MIÑARRO RECIO, J. (n.d.). *La energía cinética*. Retrieved February 8, 2021, from [http://newton.cnice.mec.es/materiales\\_didacticos/energia/cinetica.html](http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/cinetica.html)

MOLINA GOMEZ Álvaro. (2018). *Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos Clave*. [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG\\_Gomez\\_Molina\\_2018.pdf?sequence=1](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1)

- MONTOYA CONTRERAS, Yesid de Jesús; ESCOBAR TOLEDO, L. J. A. C. G. L. (2017). *Generación de Energía Eléctrica mediante el uso de material piezoeléctrico*. [https://www.researchgate.net/profile/Gerardo\\_Angulo-Cuentas/publication/321833041\\_GENERACION\\_DE\\_ENERGIA\\_ELECTRICA\\_MEDIANTE\\_EL\\_USO\\_DE\\_MATERIAL\\_PIEZOELECTRICO\\_2010-2017/links/5a33e6db45851532e82c94ce/GENERACION-DE-ENERGIA-ELECTRICA-MEDIANTE-EL-USO-DE-MATERI](https://www.researchgate.net/profile/Gerardo_Angulo-Cuentas/publication/321833041_GENERACION_DE_ENERGIA_ELECTRICA_MEDIANTE_EL_USO_DE_MATERIAL_PIEZOELECTRICO_2010-2017/links/5a33e6db45851532e82c94ce/GENERACION-DE-ENERGIA-ELECTRICA-MEDIANTE-EL-USO-DE-MATERI)
- NAJINI, H., & MUTHUKUMARASWAMY, S. A. (2017). Piezoelectric Energy Generation from Vehicle Traffic with Technoeconomic Analysis. *Journal of Renewable Energy*, 2017, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2017/9643858>
- Naylamp Mechatronics. (n.d.). *Sensor piezoeléctrico 35mm*. Retrieved April 11, 2021, from <https://naylampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/346-sensor-piezoelectrico-35mm.html>
- NETTO, R. S. (2011). Tabla de Conductividad Térmica. *Fisicanet*. [http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb03\\_conductividad.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb03_conductividad.php)
- NETTO, R. S. (2018). Tabla de Conductividad Térmica. *Fisicanet*. [http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb03\\_conductividad.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb03_conductividad.php)
- News, B. (2019). *Cambio climático: los 15 países que más CO2 emitieron en los últimos 20 años - BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-50811389>
- Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting / Elsevier Enhanced Reader*. (n.d.). Retrieved February 7, 2021, from <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0366317515000862?token=C0D02FEBDF8F60224C5A63970DED69D7E072084DAA21DCC6C8A98FEB9B094118E31B7D086ED83ABDEB4AB12F0CC1BFCC>
- Organización Mundial de la Salud. (n.d.). *Las 10 principales causas de defunción*. Retrieved February 8, 2021, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- PAPAGIANNAKIS, A. T., DESSOUKY, S., MONTOYA, A., & ROSHANI, H. (2016). Energy Harvesting from Roadways. *Procedia Computer Science*, 83, 758–765. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.164>
- Pavegen*. (n.d.). Retrieved February 18, 2021, from <https://pavegen.com/>
- PÉREZ GONZALEZ, A. (2008, January 28). *Mecapedia-Resorte de compresión*. [http://www.mecapedia.uji.es/resorte\\_de\\_compresion.htm](http://www.mecapedia.uji.es/resorte_de_compresion.htm)

- PÉREZ PINEDA Erick; VELÁZQUEZ ALFARO salvador. (2016). *Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia* [8].  
[https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21498/1/Diseño en implementación de un generador piezoeléctrico baldosa%2C para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21498/1/Diseño%20en%20implementación%20de%20un%20generador%20piezoeléctrico%20baldosa%20para%20alimentar%20un%20sistema%20de%20iluminación%20de%20baja%20potencia.pdf)
- Pierre Curie* - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved February 12, 2021, from [https://es.wikipedia.org/wiki/Pierre\\_Curie](https://es.wikipedia.org/wiki/Pierre_Curie)
- Profesional, U., & Mateos, A. L. (n.d.). *PISO GENERADOR DE ENERGIA ELECTRICA INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA “PROPUESTA DE DISEÑO DE UN PISO GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA.”*
- RAFFINO, M. E. (2020, July 13). *Energía Mecánica - Concepto, tipos y ejemplos*. Última Edición. <https://concepto.de/energia-mecanica/>
- RUBIO JIMÉNEZ, A. F. (2018). *Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting (Recolectores de energía) basados en piezoelectricidad*.
- Sal de la Rochelle* - EcuRed. (n.d.). Retrieved February 8, 2021, from [https://www.ecured.cu/Sal\\_de\\_la\\_Rochelle](https://www.ecured.cu/Sal_de_la_Rochelle)
- SERRA REQUENA, B. (2017). *Energía potencial*.  
<https://www.universoformulas.com/fisica/dinamica/energia-potencial/>
- Sostenible, M. de A. y D. (2012). *Diagnostico Nacional de salud Ambiental*.  
[https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico de salud Ambiental compilado.pdf](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf)
- SOTELDO DELFADILLO, R. N. C. E. D. (2018). *ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A TRAVÉS DE DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas].  
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/15578/SoteloDelgadilloRodrigo?sequence=1>
- Tecnitool. (2020, January 1). *Tipos de tornillos y tirafondos para madera y carpintería*.  
<https://www.tecnitool.es/tipos-de-tornillos-para-madera/>
- Tecnoinformatic.com. (n.d.). *CONDENSADOR ELECTRICO: ¿QUÉ ES?, FUNCIONES, Y MÁS*. Retrieved April 11, 2021, from <https://tecnoinformatic.com/c-electronica/condensador/>



- Tomorrow City. (2021). *¿Qué es la piezoelectricidad y cómo genera energía?*  
<https://www.smartcitylab.com/blog/es/transformacion-digital/piezoelectricidad-generar-energia-con-movimiento/>
- Top 5 países más contaminantes.* (n.d.). Retrieved February 7, 2021, from  
<https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/top-5-paises-mas-contaminantes/>
- Topacio - EcuRed.* (n.d.). Retrieved February 8, 2021, from  
<https://www.ecured.cu/Topacio#Usos>
- TORRES ORTEGA, H. H. (n.d.). *Rectificador de Onda Completa - Puente de Diodos - HETPRO TUTORIAL.* Retrieved April 11, 2021, from <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/rectificador-de-onda-completa/>
- Turmalina - EcuRed.* (n.d.). Retrieved February 8, 2021, from  
<https://www.ecured.cu/Turmalina>
- Usalo. (2019, February 25). *Energías saludables.* <http://usalo.es/energias-saludables/>
- VIVAS, J. (n.d.). *Los poblados que aún no tienen energía eléctrica en Colombia - Otras Ciudades - Colombia - ELTIEMPO.COM.* El Tiempo. Retrieved March 15, 2021, from <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-poblados-que-aun-no-tienen-energia-electrica-en-colombia-324980>
- WILLIAN, R. (2017). *La historia de los combustibles fósiles (The Story of Fossil Fuels) 6-Pack - Google Libros* (Teacher Created Materials (Ed.)).  
<https://books.google.com.co/books?id=kmt6DwAAQBAJ&hl=es&num=100>

## ANEXOS

### Anexo 1. Código usado en Matlab

```

Editor - Untitled4*
Matlab.m  Untitled4*  +
1      clear all
2      datos=xlsread('R12mixto.xlsx')
3      tiempo=datos(:,1) %columna 1
4      voltaje=datos(:,2) %columna 2
5      figure
6      plot(tiempo, voltaje); title('Voltaje')
7      xlabel('Tiempo')
8      ylabel('Voltaje')
9
10     t1=0; %Tiempo inicial
11     t2=55; %Tiempo final
12     R=12000; %ohms
13
14     p=voltaje.^2/R
15     intervalo=tiempo>t1 & tiempo<t2;
16     Pint=trapz(tiempo(intervalo),p(intervalo)); %Integral de la potencia (area). potencia acumulada
17     Pprom=Pint/(t2-t1) %Potencia promedio
18     figure
19     axis([0 60 0 2.5e-3])
20     plot(tiempo(intervalo),p(intervalo)); title('Potencia')
21     xlabel('Tiempo')
22     ylabel('Potencia')
23     hold on
24     plot(tiempo(intervalo),Pprom.*ones(size(tiempo(intervalo))))

```

Fuente: el autor

### Anexo 2. Código de Matlab para la gráfica de todas las potencias generadas

```

Matlab.m  Untitled4.m  Untitled*  +
1      R=[ 5 12 15 20 27 33 52 72 103 124 150]
2      P1=[1.4431e-05  2.798e-05  3.1559e-05  4.4092e-05  5.4558e-05  5.8140e-05  3.2494e-05  3.9564e-05  3.7691e-05  3.6112e-05  3.2250e-05]
3      plot(R,P1,'r*-')
4
5      P2=[6.0050e-05  8.7799e-05  8.1585e-05  7.7277e-05  1.0246e-04  1.2086e-04  1.0585e-04  7.9423e-05  6.9253e-05  6.7910e-05  6.1507e-05]
6      P3=[3.5293e-05  4.6980e-05  5.1058e-05  5.1519e-05  5.2178e-05  7.9466e-05  7.8995e-05  7.6452e-05  5.3636e-05  5.2378e-05  3.9903e-05]
7      hold on
8      plot(R,P2,'b*-')
9      plot(R,P3,'g*-')
10
11     legend('Serie','Paralelo','Mixto')
12     grid on
13     title('Potencia')
14     xlabel('Resistencias')
15     ylabel('Potencia')

```

Fuente: el autor

Anexo 3. Código usado en Arduino

```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
[✓] [→] [📄] [↑] [↓]
arduino
//float voltaje;
//int pinentreda=A5

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int voltaje1 = analogRead(A5);
  float voltaje = voltaje1*(5.0/1023.0);
  Serial.println(voltaje);

  delay(10);
}
```

Fuente: el autor

DocuSigned by:

*Jonathan Fernando Burbano Barahona*

7C5C7ADA3E5B4D7...

Firma Estudiante

Nombre: Estudiante Jonathan Fernando Burbano Barahona

Código: 701764

---

Firma Asesor del Trabajo de Grado

Nombre: MSC. José León

FECHA (31/05/2021)