



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE UN COLECTOR DE ENERGÍA
PIEZOELÉCTRICO APROVECHANDO LA CIRCULACIÓN
DE VEHÍCULOS EN ESTRUCTURAS PAVIMENTADAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: JORGE LUIS LALVAY LALVAY

DIRECTOR: ING. DANIEL ORLANDO ICAZA ÁLVAREZ

CUENCA – ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE UN COLECTOR DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICO
APROVECHANDO LA CIRCULACIÓN DE VEHÍCULOS EN
ESTRUCTURAS PAVIMENTADAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: JORGE LUIS LALVAY LALVAY

DIRECTOR: ING. DANIEL ORLANDO ICAZA ÁLVAREZ

CUENCA – ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Jorge Luis Lalvay Lalvay portador de la cédula de ciudadanía N.º 0107479016. Declaro ser el autor de la obra: "Diseño de un colector de energía piezoeléctrico aprovechando la circulación de vehículos en estructuras pavimentadas", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 10 de marzo de 2023



F:

Jorge Luis Lalvay Lalvay
0107479016

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Luis Lalvay Lalvay, bajo mi supervisión.



Firmado electrónicamente por:

DANIEL ORLANDO
ICAZA ALVAREZ

Ing. Daniel Orlando Icaza.
DIRECTOR

DEDICATORIA

Esta tesis es para Dios, porque gracias a él pude terminar mi carrera; para mis padres porque siempre han estado brindándome apoyo y consejos para hacerme una mejor persona; a mis hermanas y sobrinos, por sus palabras y su compañía, mis amigos y compañeros y todos los que han contribuido de alguna manera a mis objetivos

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo agradezco a Dios por ser mi guía en mi vida, dándome paciencia y sabiduría, para que pueda culminar con éxito las metas que me propongo.

Gracias a mis padres, quienes han sido mis pilares fundamentales y quienes me han apoyado incondicionalmente a pesar de las adversidades e inconvenientes que se han presentado.

Agradezco a mi director de tesis el Ing. Daniel Icaza, cuya experiencia, conocimiento y empuje me guiaron durante la investigación.

Agradezco a todos los docentes que me inspiraron con sabiduría, conocimiento y apoyo para desarrollarme como persona y profesionalmente en la Universidad Católica de Cuenca.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar un recolector de energía piezoeléctrico de presión completa aprovechando la circulación de vehículos en estructuras pavimentadas. Se determinan las diferentes condiciones que se pueden presentar para la generación de electricidad a partir del colector. Se realizan los ensayos a nivel de laboratorio, basada en estructuras pavimentadas para simular el comportamiento del recolector a pequeña escala. Se desarrolla un estudio de factibilidad del proyecto para usar en las vías donde se encuentra mayor circulación vehicular. Para efectuar la investigación se utiliza el método inductivo, con un enfoque mixto y un alcance descriptivo-correlacional. Los resultados muestran que es posible aprovechar este sistema con equipos a 12V en corriente continua debido a que existe mayor circulación de vehículos livianos en la Ciudad de Cuenca. La energía producida se almacena en baterías y puede ser empleada para abastecer cargas como foto radares, sistemas electrónicos de señalización, luminarias de baja carga, entre otros.

Palabras clave: recolector piezoeléctrico, energía, estructuras pavimentadas

ABSTRACT

The present research aims to design a full-pressure piezoelectric energy harvester taking advantage of vehicle traffic on paved structures. The different conditions for generating electricity from the collector are determined. Laboratory tests are carried out, based on paved structures, to simulate the collector's behavior on a small scale. A project feasibility study is developed for its use on the roads with the highest vehicular traffic. The research used the inductive method, with a mixed approach and a descriptive-correlational scope. The results show that it is possible to use this system with 12V DC equipment due to the increased circulation of light vehicles in Cuenca. The energy produced is stored in batteries and can be used to supply loads such as photo radar, electronic signaling systems, and low-load luminaires, among others

Keywords: piezoelectric harvester, energy, paved structures

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1	1
1. INTRODUCCION	1
1.1 Objetivos	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1.2 Alcance	2
1.3 Justificación	3
1.4 Metodología	4
CAPITULO 2	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Energías renovables	6
2.2 Tipos de energías renovables.....	7
2.3 La piezoelectricidad.....	7
2.3.1 La polarización de los dispositivos piezoeléctricos	9
2.4 Materiales piezoeléctricos.	9
2.5 Tipos de materiales piezoeléctricos.	10
2.6 Colectores de energía.....	10
2.7 Clasificación de los colectores de energía.....	11
2.8 Aplicaciones de los colectores de energía.	12
2.9 Estudios previos sobre colectores piezoeléctricos.....	12
CAPÍTULO 3	17
3. MODELADO Y SIMULACION	17
3.1 Modelado Matemático	17
3.2 Modos de acoplamiento	20
3.3 Simulaciones en diferentes condiciones de tráfico vehicular	21
3.3.1 Proceso constructivo	23
3.4 Estructura asfáltica	24
3.5 Posibilidad de generar sistemas híbridos.....	25
3.6 Diseño y modelado.....	25
3.7 Aplicaciones eléctricas empleando sistemas piezoeléctricos a nivel de carretera.....	31
3.8 Análisis experimental	31

CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
Anexos.....	49

LISTA DE FIGURAS

<i>Fig. 1 Ubicación de CIITT, Universidad Católica de Cuenca.</i>	2
<i>Fig. 2 Diagrama descriptivo</i>	5
<i>Fig. 3 Polarización de los PZT</i>	9
<i>Fig. 4 Diagrama general del sistema de recolector de energía a través de un piezoeléctrico</i>	18
<i>Fig. 5 Estructura para un eficiente diseño del piezoeléctrico</i>	18
<i>Fig. 6 Prototipo constructivo de un dispositivo piezoeléctrico PZT-5H</i>	19
<i>Fig. 7 Modos de acoplamiento 33-(izquierda) y 31-(derecha) de la captación de energía piezoeléctrica.</i>	20
<i>Fig. 8 Laboratorio de pruebas</i>	21
<i>Fig. 9 Dimensión del dispositivo Piezoeléctrico</i>	22
<i>Fig. 10 Preparación y construcción del prototipo a pequeña escala</i>	23
<i>Fig. 11 Prototipo final de forma cilíndrica</i>	24
<i>Fig. 12 Estructura típica de pavimento asfáltico</i>	24
<i>Fig. 13 Circuito recolector de energía</i>	26
<i>Fig. 14 Circuito de captación de energía piezoeléctrica y termoeléctrica</i>	27
<i>Fig. 15 Esquemas de recolección híbrida para topologías en paralelo (a) y en serie (b)</i>	29
<i>Fig. 16 Medición de voltaje del colector</i>	30
<i>Fig. 17 Aplicación del piezoeléctrico</i>	31
<i>Fig. 18 Voltaje generado a una carga de 50kN</i>	32
<i>Fig. 19 Voltaje generado a una frecuencia de 10Hz</i>	32
<i>Fig. 20 a) Carga de 40kN con diversas frecuencias b) Resistencia de 10MΩ a diferente carga</i>	34
<i>Fig. 21 a) Diferente frecuencia con una resistencia de 10MΩ b) Conexiones en paralelo</i>	34
<i>Fig. 22 a) Conexión en serie b) Conexiones en serie y paralelo</i>	35
<i>Fig. 23 a) Varios dispositivos conectados en paralelo b) Varios dispositivos conectados en serie con frecuencia y carga constante.</i>	35
<i>Fig. 24 Energía producida por dispositivos piezoeléctricos de distintas dimensiones</i>	36
<i>Fig. 25 Pruebas de Piezoeléctricos a distintas cargas</i>	36
<i>Fig. 26 Ensayos a distintas frecuencias</i>	37
<i>Fig. 27 Rendimiento con distintas cantidades de piezoeléctricos y diferentes metodologías de conexión</i>	37
<i>Fig. 28 Rendimiento de tensión y potencia con respecto a la velocidad del automotor con cargas grandes</i>	38
<i>Fig. 29 Rendimiento con respecto a la velocidad del automotor con cargas Pequeñas</i>	38
<i>Fig. 30 Voltaje de salida a distintas velocidades con carga</i>	39
<i>Fig. 31 Voltaje a distintas combinaciones de estructura pavimentada</i>	39
<i>Fig. 32 Voltaje a diferentes cargas</i>	40
<i>Fig. 33 Voltaje de salida a diferente temperatura</i>	40
<i>Fig. 34 Piezoeléctricos sin carga bajo diferentes tipos de pavimento</i>	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones técnicas del Piezoeléctrico.....	22
Tabla 2 Numero de vehículos que circulan en algunos puntos	33
Tabla 3 Deformación de los dispositivos piezoeléctricos.....	33

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Datasheet de piezoeléctrico (Diaphragms).....	49
Anexo 2: Datasheet de piezoeléctrico (External Drive Type)	49
Anexo 3: Datasheet de piezoelectric (Self drive type).....	50
Anexo 4: Datasheet de piezoeléctrico (Diaphragms notice).....	51
Anexo 5: Simulación en sketchup (diferentes perspectivas)	52
Anexo 6: Elaboración del prototipo en CIITT	54

CAPITULO 1

1. INTRODUCCION

Con la necesidad de seguir produciendo energía renovable a través de sistemas que no consuman recursos naturales no renovables como el carbón, el petróleo o el gas, y por supuesto que contaminen mucho menos el medio ambiente, una alternativa a la generación de energía son los sistemas piezoeléctricos.

Un material piezoeléctrico es un material que cuando se le aplica tensión mecánica, induce una corriente eléctrica (efecto directo) o cuando se le aplica una corriente eléctrica, el material se deforma (efecto inverso).

Ya son varios los proyectos donde se ha aprovechado la energía por efecto piezoeléctrico, paneles que se iluminan cuando pasan peatones, zapatos con dispositivos capaces de generar electricidad para cargar teléfonos móviles, e incluso pistas de baile piezoeléctricas, se intenta aprovechar la energía de la persona que baila sobre él.

Por lo tanto, la investigación de este trabajo radica en el aprovechamiento de la energía mediante el uso del efecto piezoeléctrico. Azulejos en calles peatonales, calzados con cargadores, autopistas. Las oportunidades para esta tecnología son enormes, pero nuestra investigación principal se basará en las carreteras, donde los vehículos en movimiento pueden utilizarse como fuentes de energía.

Independientemente de la opción, lo positivo es que la tecnología de recolección de energía a través de dispositivos piezoeléctricos es independiente de los vehículos en la carretera. Esto significa que independientemente de la fuente de energía del vehículo, independientemente del tipo de vehículo, generan electricidad cuando están circulando en la carretera.

Esta tecnología se ha implementado en todo el mundo, por ejemplo: en estaciones de metro en Japón, en los graderíos del estadio Santiago Bernabéu y la más recientemente en diferentes centros de entretenimiento en Holanda.

1.1 Objetivos

Objetivo general

Diseñar un recolector de energía piezoeléctrico de presión completa aprovechando la circulación de vehículos en estructuras pavimentadas.

Objetivos específicos

- Definir en el laboratorio las condiciones de simulación del recolector de energía piezoeléctrico en estructuras pavimentadas.
- Construir una maqueta de prueba en el laboratorio para la simulación del comportamiento del recolector de energía piezoeléctrico en estructuras pavimentadas a pequeña escala.
- Analizar los resultados de las pruebas de laboratorio para determinar las condiciones de generación.
- Estimar a gran escala la capacidad de generación del recolector de energía piezoeléctrico en estructuras pavimentadas.
- Efectuar un estudio de factibilidad para comprobar la rentabilidad del uso de los recolectores de energía piezoeléctricos en estructuras pavimentadas.

1.2 Alcance

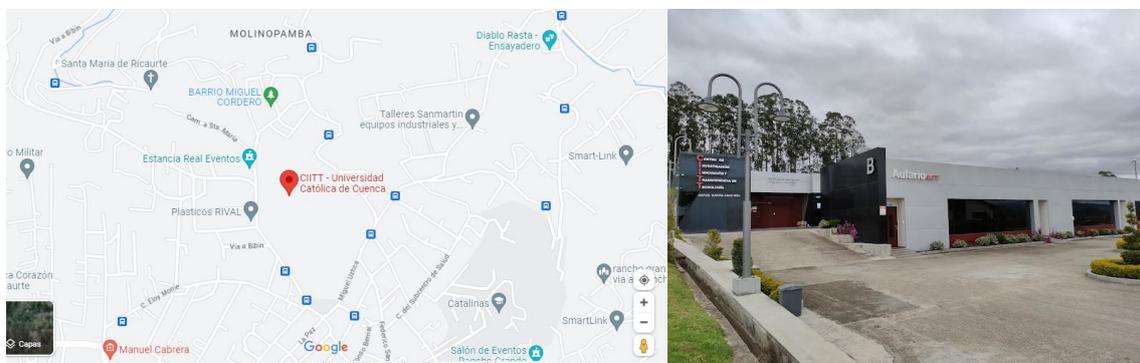


Fig. 1 Ubicación de CIITT, Universidad Católica de Cuenca.

Fuente. Elaboración propia.

El presente trabajo de investigación se ejecutará en la ciudad de Cuenca capital azuaya, se encuentra localizada en la parte sur del territorio ecuatoriano a 2550 msnm. El desarrollo del prototipo se lleva a cabo en el laboratorio de CIITT (Centro de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología), el modelo de recolector de energía piezoeléctrico aprovechando la circulación de vehículos en estructuras pavimentadas, se construyó una maqueta de prueba a nivel de laboratorio para realizar el análisis y las mediciones que se puede obtener al realizar un ensayo con diferentes pesas simulando el rodamiento del

vehículo sobre ella. Se encuentra ubicada en la parroquia de Ricaurte en el campus de la Universidad Católica de Cuenca.

1.3 Justificación

La electricidad resulta imprescindible para el desarrollo de la humanidad, ya que a partir de esta el hombre da respuesta a sus necesidades básicas. La generación de energía con combustibles fósiles, como petróleo, carbón y gas natural, supone grandes estragos para el medio ambiente, puesto que contribuye a la polución del agua, de los suelos y a la emisión de gases de efecto invernadero, con lo cual se afecta la capa de ozono.

Por ese motivo, el interés por el uso de las fuentes renovables de energía ha cobrado auge en los últimos años. De acuerdo con Shinn (2018), las energías limpias provienen de fuentes naturales inagotables, generan electricidad sin contribuir al calentamiento global y son beneficiosas por su menor impacto en la naturaleza. Por tanto, aportan a la sostenibilidad ambiental y se convierten en una alternativa para mitigar los riesgos derivados de la contaminación del entorno.

En la actualidad a nivel internacional se ejecutan disímiles proyectos, cuyo propósito consiste en valorar la producción de energías sostenibles; entre estos sobresale la implementación de sistemas piezoeléctricos en viales, carreteras, autopistas para, de este modo, proteger el medio ambiente y conservar los recursos renovables (Cardozo Gutiérrez y Tamayo Zapata, 2017).

De ahí que se plantea el siguiente problema de investigación: ¿Es posible la utilización de un recolector de energía piezoeléctrica de presión completa, aprovechando la circulación de vehículos en estructuras pavimentadas, para generar mayores niveles de voltaje y potencia?

Se diseña un sistema para generar energía eléctrica a través de un recolector piezoeléctrico de presión completa, instalado en estructuras pavimentadas, aprovechando la circulación de vehículos. Para ello se utilizan los datos obtenidos en la simulación a pequeña escala efectuada en el laboratorio.

De esta forma, luego se analiza la factibilidad que tiene la implementación del dispositivo para generar electricidad y su posible uso a gran escala.

Se desarrolla el estudio por la relevancia del uso de energías renovables, en este caso, de los recolectores de energía piezoeléctrica, en tanto constituyen fuentes limpias, pues su empleo minimiza las afectaciones al medio ambiente y, por ende, a la calidad de vida del ser humano.

1.4 Metodología

La presente investigación tiene un enfoque mixto, entendido como la combinación de elementos cualitativos y cuantitativos; los métodos utilizados en este tipo de enfoque se basan en evidencia de datos numéricos, verbales, textuales, visuales y simbólicos para comprender los problemas científicos (Creswell, 2013; Lieber y Weisner, 2010; citado en Hernández Sampieri, 2014).

De acuerdo con Newman (2002) el enfoque mixto posibilita llegar a una perspectiva mucho más amplia y profunda del fenómeno objeto de estudio, por lo cual su percepción se torna más integral, completa y holística.

Para la parte cualitativa del estudio se usa el método inductivo, el cual, de acuerdo con (Hernández Sampieri 2014), sirve para la recolección y análisis de los datos para perfilar las preguntas de investigación o, por el contrario, mostrar nuevas incógnitas surgidas durante el proceso interpretativo.

Mientras, desde el punto de vista cuantitativo, el propio (Hernández Sampieri 2014) plantea que se usa en el momento de la recolección de los datos de la investigación, puesto que no solo se basa en la bibliografía, sino que esos datos también se obtienen en el campo; además, se emplea la estadística a la hora de analizar y comparar los datos, así como para comprobar la viabilidad del estudio.

En cuanto al alcance descriptivo-correlacional, la investigación cumple los requisitos establecidos por (Hernández Sampieri 2014) para esta clasificación, porque se tiene en cuenta la energía piezoeléctrica y sus componentes, se calcula la cantidad de energía que se puede obtener a partir de los sensores piezoeléctricos, así como la transformación de energía cinética en eléctrica; se toma en cuenta el vínculo entre la energía generada y el peso ejercido por los vehículos durante su tránsito sobre estructuras pavimentadas.

Para el desarrollo del estudio se utilizan técnicas e instrumentos que facilitan llevar a cabo las actividades en cada etapa de la investigación, por ejemplo, para la búsqueda de documentos se utilizan bases de datos. En el caso de las asesorías se planifican encuentros online con expertos. Y para el análisis y la medición de los datos se utilizan instrumentos de laboratorio como por ejemplo el osciloscopio.

Se analizan y determinan las condiciones de operación para simular el funcionamiento de un recolector piezoeléctrico de energía de presión completa en estructuras pavimentadas. Se construye en el laboratorio un prototipo de prueba para simular el funcionamiento del colector a pequeña escala.

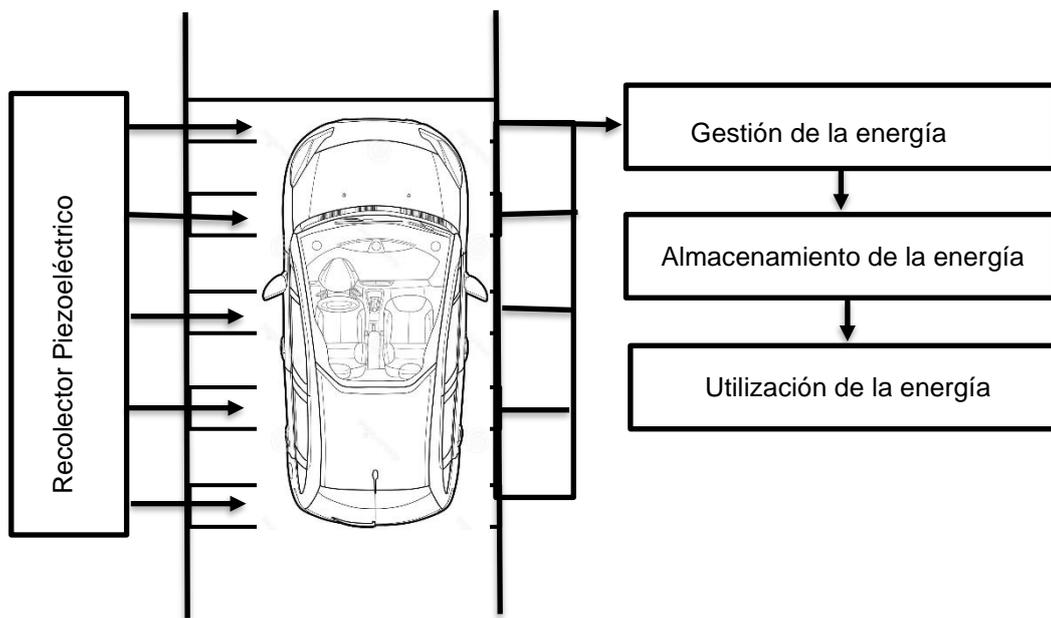


Fig. 2 Diagrama descriptivo

Fuente. Elaboración propia.

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Energías renovables

La energía siempre ha sido indispensable para los seres humanos. En la actualidad, con los innumerables avances tecnológicos, el hombre utiliza la electricidad para cubrir las demandas más básicas de su existencia, como la cocción de los alimentos, la calefacción durante el invierno o la transportación. Pero hasta la fecha, la electricidad más utilizada proviene de fuentes no renovables y contaminantes del entorno.

Por el uso y abuso ilimitado de recursos finitos, dígase el carbón, el petróleo o el gas natural, tanto en los hogares como en las grandes industrias, se afectan ciclos vitales como el del agua, aparecen las lluvias ácidas, la desertificación y la sequía, la contaminación de ríos y océanos, o se agota cada vez más la capa de ozono.

Pero el problema energético contemporáneo va mucho más allá, porque los hidrocarburos, principal fuente de energía empleada por el hombre, han demostrado que no son imperecederos y su uso sin control impacta de forma catastrófica al medio ambiente a escala global (Estrada Gasca, 2013). De ahí la insostenibilidad del sistema energético actual y la premura de varias naciones por cambiar su matriz energética a fuentes limpias, buscando la eficiencia energética con otras alternativas.

Sin embargo, existen alternativas para minimizar los efectos originados por el hombre al medio ambiente. Aparecen entonces como respuesta las energías limpias, las cuales se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; y proceden de cualquier fenómeno que no altere el equilibrio de la Tierra, cuya generación no deje residuos y que su velocidad de consumo sea inferior a la de la regeneración de la fuente energética de la materia prima empleada (Garí, 2010; Merino, s.f.).

Las fuentes renovables de energía sobresalen también por su naturaleza inagotable, renovable y su utilización libre de polución (Rodríguez Murcia, 2009). Además, de acuerdo con (Pelfini, Fulguet y Beling 2017), el uso de las energías renovables a largo plazo preserva la vida humana, mientras que propicia la existencia de sociedades más sostenibles y equitativas.

Se consideran fuentes renovables la energía solar, tanto térmica y termoenergética como fotovoltaica; además de la eólica y la hidroeléctrica, entre otras.

2.2 Tipos de energías renovables.

Cada una de las modalidades de las fuentes renovables de energía posee características distintas. (Estrada Gasca 2013) especifica que la energía solar térmica se vale de la luz del sol que incide sobre los cuerpos, la absorbe y la convierte en calor. Esta modalidad se puede usar como energía final o convertida en electricidad.

Otra de las variantes de la energía solar es la fotovoltaica y es el resultado de la luz proveniente del sol que se transforma en energía eléctrica de forma directa. Esa transformación tiene lugar mediante el principio físico del efecto fotovoltaico (Estrada Gasca, 2013). La energía fotovoltaica se genera en sistemas denominados fotovoltaicos, los cuales se componen de paneles solares, reguladores de carga, baterías, inversores y cargas eléctricas (tanto en corriente continua como alterna), así como de dispositivos auxiliares. A nivel mundial, la solar fotovoltaica es la energía de mayor crecimiento en estos momentos.

Por otra parte, (Gari, 2010) manifiesta que la energía eólica se produce a partir del viento, cuando el aerogenerador utiliza la energía cinética contenida en el aire para obtener electricidad. Este tipo de fuente renovable es de las más desarrolladas en el mundo moderno, en varias partes del planeta, sobre todo en los países del primer mundo.

Existen dos tipos de instalaciones para producir la energía eólica: mini-eólica y gran-eólica (Gari, 2010). Las mini-eólicas usan generadores de potencia —muchas veces acompañados de paneles solares fotovoltaicos, lo cual los convierte en sistemas híbridos— inferiores a 10 KW y su principal aplicación deviene la generación de energía aislada, es decir, sin conexión a red. Entre las ventajas de las mini-eólicas destacan que trabajan con vientos flojos y son capaces de obtener electricidad en los puntos de consumo con reducción de pérdidas.

Aprovechar la energía potencial contenida en un curso de agua es el rasgo característico fundamental de la energía hidráulica; esta proviene del sol, responsable de regular el ciclo hidrológico (Estrada Gasca, 2013). Para considerar la energía eléctrica como renovable, las instalaciones donde se genera no deben superar cierto tamaño, porque de lo contrario causan un impacto negativo en el medio ambiente.

2.3 La piezoelectricidad

La energía piezoeléctrica clasifica dentro de las modalidades más sostenibles para la generación de electricidad. Dicha energía consiste en la transformación de una fuerza mecánica en energía eléctrica, por mediación de objetos con ciertas características especiales, como lo son los materiales cerámicos piezoeléctricos (Ortiz Orozco, 2022).

Este tipo de energía se sustenta en el uso de ciertos materiales, cuyas propiedades eléctricas dependen si son conductores o aislantes, así como de la naturaleza de los portadores de carga, tanto electrones como iones (Ortiz Orozco, 2022).

Comprender las propiedades de la piezoelectricidad conlleva entender la estructura cristalina de esos materiales. Tamayo Zapata y Cardozo Gutiérrez (2017) explican que la conductividad eléctrica sucede según las propiedades de una inmensa variedad de materiales.

(Martin Marmcra, 2018) manifiesta que este fue descubierto por los hermanos Pierre y Jacques Curie en el siglo XIX, quienes describieron que dicho fenómeno sucede al aplicar una presión mecánica sobre el cuarzo, lo cual provoca que este se polarice y llegue a crear pequeños arcos eléctricos, sobre todo en algunos cristales y cerámicas.

Según la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (2010), el efecto piezoeléctrico muestra la interrelación entre la fuerza mecánica y un voltaje eléctrico; resulta la capacidad de ciertos materiales, entre estos minerales, cerámicas y determinados polímeros, para generar cierta carga eléctrica como respuesta a una fuerza mecánica dada.

(Cao et. al 2022) coinciden en que los recolectores de energía piezoeléctrica —Energy Harvesting— convierten la energía mecánica en energía eléctrica, proporcionando un nuevo método para la autoconsciencia energética de la infraestructura vial.

Como alternativa, la recolección de energía piezoeléctrica constituye una variante prometedora para la obtención de electricidad, porque exhibe ventajas únicas como una mayor densidad de potencia, sin importar las condiciones meteorológicas, además de menor precio, facilidad de procesamiento y preparación, excelente durabilidad y propiedades dieléctricas y piezoeléctricas estables a temperaturas normales (Huang et. al, 2022).

Existen ciertos parámetros que afectan el rendimiento en la generación eléctrica y la resistencia mecánica de los recolectores de energía piezoeléctrica. (Wang et. al 2019) mencionan que no solo incide el método de conexión, sino también el espesor, el diámetro, la capa y las propiedades de los materiales.

Cerámica policristalina y polímeros resultan los materiales piezoeléctricos más empleados (Ortiz Orozco, 2022), los cuales poseen características piezoeléctricas luego de ser sometidos a una polarización artificial.

(La Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología 2010) apunta que la cerámica piezoeléctrica más empleada es el titanato zirconato de plomo (PZT), mientras que el polímero al que más se recurre es el polifluoruro de vinilideno (PVDF).

2.3.1 La polarización de los dispositivos piezoeléctricos

La orientación aleatoria de los dominios ferroeléctricos se alinearán con la dirección del campo eléctrico, creando cargas ligadas en la superficie de la cerámica PZT, contribuyendo a sus propiedades piezoeléctricas. Cuando la tensión de compresión paralela a la dirección de polarización actúa sobre las cerámicas PZT polarizadas, la fuerza de polarización interna se reduce debido a la deformación estructural bajo presión, y las cerámicas PZT necesitan liberar las cargas unidas adsorbidas originalmente para mantener el estado inicial de equilibrio eléctrico, la descarga de los dispositivos piezoeléctricos produce una fuente de corriente.

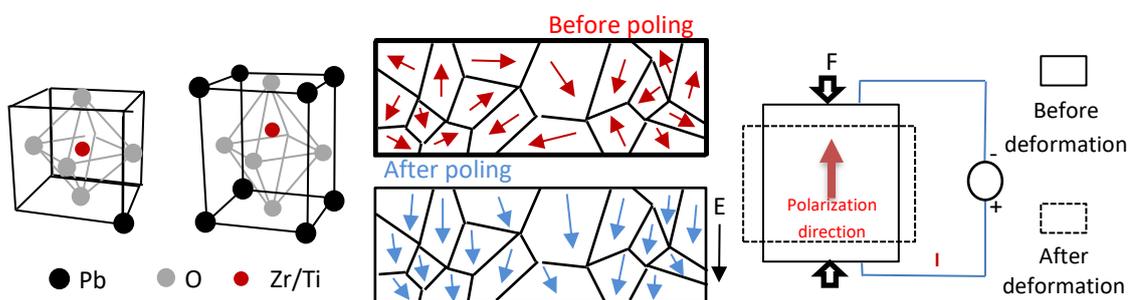


Fig. 3 Polarización de los PZT

Fuente. Elaboración propia

2.4 Materiales piezoeléctricos.

Los materiales piezoeléctricos, basados en la curva de la histéresis dieléctrica, se dividen en dos pequeños grupos: lo del tipo hard y los soft.

La curva de los materiales hard se caracteriza por ser de histéresis cerrada, la cual cuenta con un área pequeña y una de sus particularidades radica en su alta potencia; por su parte, los materiales soft poseen una histéresis abierta, con un área mayor y una elevada sensibilidad (Domínguez Chinchilla y González Pino, 2018).

Ambos autores plantean que estos materiales piezoeléctricos presentan algunas desventajas, como el deterioro ocasionado por la variabilidad de las propiedades, en dependencia de la temperatura o el límite de excitación eléctrico y mecánico (Domínguez Chinchilla y González Pino, 2018).

Los sensores piezoeléctricos precisan de tres etapas básicas (Domínguez Chinchilla y González Pino, 2018): generador, rectificador y dispositivo de almacenamiento, este último puede ser temporal, como los capacitores, u otro de menor carga como es el caso de las baterías recargables

2.5 Tipos de materiales piezoeléctricos.

En la Tierra existe una gran variedad de materiales piezoeléctricos. Los más comunes son el cuarzo, el cristal, el rubidio y la sal de Rochelle, entre otros. (Burbano Barahona 2021) señala que en el cuarzo se utiliza fundamentalmente en prototipos funcionales tipo baldosa. En este caso, gracias a la deformación física del material y por su composición química interna, se genera electricidad cuando la baldosa es pisada por las personas al caminar, al tiempo que puede almacenar energía para su uso en cualquier servicio eléctrico.

Entonces, una de las aplicaciones de los cristales de cuarzo es en circuitos filtros o como elementos para la realimentación selectiva en circuitos osciladores (Diaz, s.f.).

Los cristales piezoeléctricos varían según su tipología. Los tipos pila son los más comunes, están conformados por varias capas de cerámica con dos salidas eléctricas y cuenta también con una carcasa metálica para la protección de la cerámica (Burbano Barahona, 2021).

El piezoeléctrico tipo nano posicionador flexure (Burbano Barahona, 2021) se emplea en laboratorios de investigación y en las industrias para comprobar unidades de disco, alineadores de pantalla para rayos X y otras aplicaciones. Por su parte, los cristales piezoeléctricos combinados con posicionamiento motorizado y en muchas ocasiones se combinan con un tipo de actuadores para conformar un sistema más complejo.

2.6 Colectores de energía

Convertir la energía mecánica en electricidad sin causar estragos al entorno, se ha convertido en una necesidad para el hombre. De este modo, aparecen los colectores de energía piezoeléctricos los cuales se encargan de recuperar, reutilizar y aprovechar la energía presente en el ambiente, pero que por diferentes motivos se desaprovechan (Erturk e Inman, 2011). Estos sistemas convierten las energías solar, eólica y térmica, entre otras denominaciones, así como el ruido o las vibraciones en electricidad (Park, Lee y Kwak, 2012; Paulo y Gaspar, 2010).

El propósito de los dispositivos colectores es suministrar una fuente de energía remota y amigable con el entorno, al tiempo que facilitan la recarga de unidades de almacenamiento, como las baterías.

Los piezoeléctricos, conocidos también como materiales ferroeléctricos inteligentes, transforman las vibraciones del ambiente en energía útil; tienen la propiedad de deformarse cuando se someten a distorsiones mecánicas exteriores o a un campo eléctrico, por ejemplo, cuando provienen del movimiento de las personas, un sismo o la circulación de

vehículos (Ahmehd, Mir y Banerjee, 2017; Kaur, Graak, Gupta, Chhabra, Kumar y Shetty, 2016; Shevtsov y Flek, 2016; Howells. 2009).

Estudios efectuados por (Tian, Li, Yi, Liu y Yang 2018) y (Du et al., 2017) establecen que existen cuatro métodos tradicionales para la recolección de energía —electromagnética, electrostática, piezoeléctrica y triboeléctrica—, cada una con ventajas y desventajas. Estos autores también coinciden en que los piezoeléctricos constituyen los de mayor densidad de potencia.

Existe una gran variedad de dispositivos piezoeléctricos, entre estos sobresalen los fabricados con cerámico PZT —titanato circonato de plomo—, capaces de aportar mayores cantidades de energía (Ahmehd, Mir y Banerjee, 2017); además de otras tipologías mucho más comunes, como la viga cantiléver o en voladizo.

2.7 Clasificación de los colectores de energía.

Los colectores piezoeléctricos se caracterizan según el tipo de energía usado para su funcionamiento, a la par que cada uno se interrelaciona con el transductor correspondiente. Pedersen, (Buhl y Sigmund 2001) indican que los colectores se dividen en cinco grupos: los mecánicos, los magnéticos, los radiantes, los térmicos y los bioquímicos.

Estos autores afirman que los mecánicos son aquellos que utilizan la presión, la cinética, las vibraciones e infinidad de actividades humanas como fuente esencial en la generación de electricidad, la que se convierte mediante generadores de corriente directa y corriente alterna, así como unidades piezoeléctricas, electrostáticas o inductivas (Pedersen, Buhl y Sigmund, 2001).

Por otro lado, los colectores magnéticos aprovechan el efecto Wiegand. Este se explica por la conmutación de la magnetización del área central de un hilo ferromagnético, en el momento en que este se somete a un campo magnético externo intenso (Pedersen, Buhl y Sigmund, 2001).

Mientras, (Pedersen, Buhl y Sigmund, 2001) indican que los colectores radiantes se valen de la radiación, ya sea electromagnética u óptica, para producir energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas, inducción de bobinas y antenas.

En el caso de los colectores térmicos, estos emplean elementos piroeléctricos y termoeléctricos para la generación de electricidad; en tanto, los bioquímicos se basan en las reacciones químicas (Pedersen, Buhl y Sigmund, 2001). No obstante, sin importar de que tipo sean los colectores, lo cierto es que estos tienen disímiles aplicaciones.

2.8 Aplicaciones de los colectores de energía.

En los últimos años muchos investigadores se han adentrado en el mundo de la piezoelectricidad. La electricidad obtenida a partir de colectores de energía piezoeléctricos tiene múltiples aplicaciones en infinidad de campos de estudio.

Por ejemplo, en Medicina (Fadil, Saber y Patra, 2013), la energía obtenida de los colectores se utiliza para el funcionamiento de implantes como los marcapasos, muchos de los cuales han sido introducidos dentro del cuerpo humano gracias al avance de la ciencia. De esta forma, resulta imprescindible el empleo de baterías, pero estas presentan una vida útil limitada y en la actualidad la recarga o el cambio de esas pilas tiene un alto costo monetario, pero también significa un riesgo para la vida del paciente porque debe someterse a cirugía para dicho procedimiento.

También dentro del campo de la Medicina, los colectores de energía se han diseñado para brindar potencia eléctrica a los sistemas encargados de revisar el estado de las prótesis, como las cargas que soportan las prótesis o las fallas, dígase el aflojamiento, con el consiguiente impacto negativo en su funcionamiento, ocasionando dolor o malestar a los pacientes (Soraes dos Santos et. al., 2013).

Otro caso deviene la producción de energía mediante las vibraciones. De esta forma, indican (Minaza, Vasic y Costa 2008), se pueden aprovechar las vibraciones a las que se somete una bicicleta al transitar por algunos tipos de terreno, con lo cual recuperan esa energía a partir de un transductor piezoeléctrico.

De manera especial, una aplicación de los Energy Harvesting consiste en alimentar a sensores individuales o a redes de sensores inalámbricos, ya que esta es una de las modalidades más desarrolladas en la Medicina moderna, por los bajos niveles de potencia (Sepúlveda, 2014).

En otro orden, la generación de energía a partir de los dispositivos piezoeléctricos es el futuro de las ciudades inteligentes. (Pirisi et al. 2012) sugieren la transformación de energía mecánica en eléctrica aprovechando el tráfico de vehículos, ya que en la actualidad esta es de las más costosas en términos energéticos y, asimismo, presenta pérdidas en su funcionamiento porque solo el 30 % del combustible aporta energía al automóvil, el resto se disipa en la etapa de desaceleración por el frenado y por los gases que emite, los cuales también dañan al medio ambiente.

2.9 Estudios previos sobre colectores piezoeléctricos

La mayoría de las investigaciones desarrolladas hasta la fecha, sobre todo en los últimos 10 años han sido innovadoras. Numerosos países se han sumado a la alternativa de

producir energías limpias para proteger al medio ambiente. (Psoma, Tzanetis y Tournalidakis 2017) explican que en Grecia crearon un sistema de recolección de electricidad, basado en un guante construido con materiales piezoeléctricos, el cual tiene al cuerpo como fuente de generación de electricidad.

Otra propuesta proviene de Estados Unidos, pues en un experimento aprovecharon las oscilaciones de una bandera con material piezoeléctrico, del tipo polifluoruro de vinilideno, para captar la energía eólica y transformarla en electricidad (Orrego et al., 2017).

Un gran impulso tuvo en la última década el uso de las losas piezoeléctricas, puesto que con estas es posible obtener una cantidad de energía suficiente para alimentar sistemas de iluminación al aprovechar la energía cinética generada por las personas, autos o bicicletas al comenzar a moverse.

Israel construyó un proyecto piloto en 2009, cuyo propósito consistía mostrar que era posible almacenar energía proveniente del asfalto y para ello la compañía Innowattech impulsó un sistema de recolección de electricidad en el pavimento, con transductores piezoeléctricos (Xu et al., 2017; Yang, Wang, Zhou, Wei, y Zhao, 2018).

(Xie y Wang 2015) sugieren que en Emiratos Árabes Unidos se desplegó un sistema de suspensión basado en un transductor piezoeléctrico, con el fin de recolectar las vibraciones derivadas de las irregularidades de la superficie de las carreteras.

Una investigación desplegada en el Instituto Nacional de Tecnología de Karnataka, en la Universidad pública de ingeniería en Surathkal, de la India, sugiere una nueva técnica para la obtención de energía con sensores piezoeléctricos a través de las vibraciones del suelo no deseadas, las que pueden remover estructuras cercanas o causar contaminación acústica gracias a una serie de placas vibratorias nombradas sensores piezoeléctricos, en cuyo caso la frecuencia de las diferentes vibraciones son transformadas en un suministro alternativo (Chandra y Mohammed, 2015).

El propio estudio plantea que ese suministro alternativo posteriormente se convertirá en suministro directo, impulsado por un diodo de conmutación ultrarrápido y las vibraciones son transformadas en un suministro alternativo (Chandra y Mohammed, 2015); la salida resultante se almacena en una batería para usarla después, aunque también se puede consumir de forma directa por cargas. Por ese motivo, se puede afirmar que es posible generar electricidad con las vibraciones no deseadas sin utilizar ningún tipo de combustible.

Desde el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Hanyang, en Seúl, Corea del Sur, los investigadores Jabbar y (Do Hong 2017) afirman que las baldosas de recolección de energía piezoeléctricas se emplean para transformar la energía proveniente

de los pasos de los peatones en electricidad; estos se pueden usar a nivel de micro o milivatios para almacenar y alimentar equipos eléctricos.

Estados Unidos, por su parte, en 1987 creó la empresa MicroStrain, con el objetivo de desarrollar los sensores piezoeléctricos en los campos de la Aeronáutica, la Medicina, el Automovilismo y la Construcción; los principales productos de dicha entidad son las vigas para el soporte de estructuras, cuya función es monitorear la salud y estabilidad de esas vigas para medir la tensión a la que se somete a la mencionada estructura; esta acopia energía en el condensador y este, a su vez, envía una señal inalámbrica a un receptor (Ibós, s.f.).

Por otro lado, en el Instituto Técnico de Massachusetts (MIT), también en Estados Unidos, desarrollaron en 1995 un equipo responsable de generar energía mediante la vibración de baja frecuencia existente en tuberías o puentes; como el dispositivo era muy compacto, del tamaño de una moneda, las baterías fueron reemplazadas por otras con capacidad de generar un volumen de energía superior hasta 100 veces por encima de un equipo convencional (Chu, 2011).

También en Estados Unidos, en el año 2000, la compañía Continuum creó un dispositivo denominado iPower Generator, el cual era capaz de transformar la energía mecánica en eléctrica al usar materiales piezoeléctricos (Scheider Electric, 2016). El iPower Generator sirvió para atravesar el ártico en las expediciones de Bancoft Arnesen.

La empresa JR East de Tokio, en Japón, logró instalar en 2006 dispositivos piezoeléctricos en los puntos de acceso de la estación del metro de Marunouchi (Scheider Electric). Los datos de este estudio permitieron conocer que la máxima cantidad de energía obtenida a diario fue de 10kW, con un total de 800 000 usuarios.

En 2007, dos alumnos del Departamento de Arquitectura del MIT formularon la idea de crear unas losetas para aprovechar la energía mecánica obtenida después del paso de los peatones para generar energía eléctrica. Esta iniciativa resultó ganadora del concurso para la Construcción sostenible, convocado en Suiza y ejecutado por Holcim (Chila Pacheco y Chong Proaño, 2019). Como resultado, el proyecto piloto se efectuó en la estación de Turín, en Italia, donde por cada panel instalado obtuvieron electricidad para 4 bombillas.

También en 2007 un estudioso del Instituto de Investigación Tenchnion, de conjunto con la empresa Innowatwech, de Israel, presentaron un sistema para la recaudación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la presión que ejercen los vehículos que transitan por la autopista (Kholerman, 2012). Dicho programa se efectuó en un espacio de 10 metros de la carretera cuarta, ubicada al norte de Hadera-Israel, donde emplazaron una serie de piezoeléctricos a 5 metros por debajo del asfalto, los cuales se conectaron a baterías y la

energía almacenada se usó en algunos locales de la zona o para la iluminación vial. El investigador estima que se pueden obtener 2 kWh. En la actualidad el dispositivo está diseñado, patentado (Patente nº US 7 830 071 B2, 2010) e instalado; además, sus dimensiones son de 4x4x2 cm, con una matriz serie de transductores piezoeléctricos de 8x8, los que generalmente son de forma circular o cuadrada.

Un sistema de rampas diseñado por el ingeniero británico Peter Hughes en 2009, acoplado en el estacionamiento del supermercado Sainsbury's en Gloucester, Reino Unido, permitió recoger energía y usarla para alimentar todas las cajas registradoras de la tienda con 30 kW (Tapia, 2014).

En ese propio año en Estados Unidos, se ejecutó otro proyecto en la Universidad de Michigan, esta vez conocido como Parametric Frequency Increased Generators (Tapia, 2014), con el propósito de obtener energía no solo del flujo vehicular, sino con el aprovechamiento del movimiento humano.

La provincia de Hardenberg, en Holanda, acogió una prueba piloto en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2011 (Aprender Electrónica, s.f), donde pretendían instalar un sistema de sensores piezoeléctricos para la recolección de energía en una autopista rural. Sin embargo, el material empleado no aguantó la presión de los automóviles y por este motivo la pesquisa finalizó varias semanas antes de lo previsto.

Una investigación para determinar la cantidad de potencial eléctrico que sería posible obtener con el montaje de un sistema de generadores piezoeléctricos en la vía Attiki Odos fue realizado en Grecia (Galindo Ceballos y Prado Rodríguez, 2018). Este estudio llegó a la conclusión de que los piezoeléctricos en estas vías son capaces de proporcionar una cantidad de energía suficiente para alumbrar las autopistas en la medida en que la extensión de la carretera era mayor, porque permitió el emplazamiento de disímiles generadores de energía piezoeléctricos y se pudo obtener longitudes de 6000 metros, con la ventaja de generar energía de 22855217,92 kW*h anualmente. La principal ventaja es el impacto ambiental, puesto que tras su instalación no se alteran las condiciones del medio ambiente.

En el caso de América Latina, sobresalen los estudios en Colombia. En este país, en la ciudad de Medellín, desplegaron el proyecto Treevolt del programa Inlab2Market en 2013. El objetivo era recolectar energía eléctrica en las vías de la ciudad a partir de materiales piezoeléctricos. (RutaN 2014) explica que realizaron los trámites para pedir información directa a Ruta N de Medellín acerca del proyecto efectuado en la ciudad con material piezoeléctrico, pero esta solicitud por correo electrónico fue denegada, alegando que se trataba de un asunto privado.

Hacia el año 2014 el grupo de Diseño Mecánico Computacional (DIMEC) de la Universidad Nacional de Colombia formuló un prototipo para la obtención de energía eléctrica, tras convertir la energía mecánica que produce una persona al caminar, a partir del Método de Optimización Topológica (Sepúlveda Orozco, 2014). Para ello, estos colectores se construyeron con piezoeléctricos PZT-5, los cuales estaban disponibles comercialmente, no fue necesario modificar su estructura interna y se ajustaron a un mecanismo óptimo y flexible capaz de incrementar la vida útil del piezoeléctrico, así como lograr estimularlo de forma homogénea para alcanzar un rendimiento máximo del sensor.

(Tamayo Zapata y Cadozo Gutiérrez 2017) explican que en 2017 la Universidad Católica de Colombia presentó un sistema para la obtención de energía eléctrica sostenible en tres tramos de la ciudad de Bogotá. De acuerdo con los investigadores, el proyecto tendría una vida útil de 30 años, período en el cual no requerirá de ningún tipo de mantenimiento.

Un informe de la Universidad Distrital Francisco José de Cadals explica que se examinó el estado de las tecnologías para la recolección de energía en la ciudad de Bogotá, en Colombia. (Jiménez Rubio 2018) señala que el mencionado informe analizó el método que utilizó Colombia en cuanto a los generadores piezoeléctricos.

(Galindo Ceballos y Prado Rodríguez 2018) indican que también en 2018 se llevó a vías de hecho otro proyecto similar, esta vez en la Pontificia Universidad Javeriana, de Santiago de Cali, donde se fomentó el empleo de las baldosas piezoeléctricas para la generación de energía piezoeléctrica, con el fin de usarla para alimentar un trecho de la carretera. Este sería un modo de resolver la falta de iluminación en ese tramo de la vía sin contaminantes.

Otro proyecto innovador fue propuesto por Núñez Culqui, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, quien sugiere la generación de energía eléctrica con el uso de baldosas piezoeléctricas, implementado en la pista de baile de la discoteca La Cayet, en el distrito de Soritor, en el departamento de San Martín. El autor examinaba la posibilidad de aprovechar la vibración generada por la gente al bailar para luego emplearla en la iluminación del propio centro nocturno.

Por último, en 2019 estudiantes de la facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, de la Universidad Nacional de Ucayali, buscaban generar energías limpias mediante la cogeneración de materiales piezoeléctricos y paneles solares fotovoltaicos (Pita del Águila, Torres Rengifo, Valderrama Acosta y Vega Soria, 2019).

Sin dudas, los colectores piezoeléctricos constituyen una gran oportunidad para la obtención de energías limpias, de modo que resultan también una respuesta positiva ante el deterioro del medio ambiente.

CAPÍTULO 3

3. MODELADO Y SIMULACION

3.1 Modelado Matemático

Los materiales piezoeléctricos pueden encontrarse en la naturaleza o fabricarse artesanalmente. Cristales como el cuarzo (SiO_2), la sal de Rochelle, el topacio y los minerales del grupo de las turmalinas son ejemplos de materiales piezoeléctricos naturales; El titanato de bario ($BaTiO_3$), el titanato de plomo ($PbTiO_3$), el titanato de circonato de plomo ($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3, 0 < x < 1$), conocido comercialmente como PZT, y el polivinilideno fluoruro son algunos ejemplos de materiales piezoeléctricos fabricados por el hombre que se presentan en forma de cerámicas, polímeros y compuestos (Dineva et al., 2014). Los materiales piezoeléctricos pueden generar electricidad cuando son inducidos por una tensión mecánica, lo que se denomina efecto piezoeléctrico directo. Este efecto se utiliza habitualmente en la fabricación de sensores y dispositivos de captación de energía. También pueden deformarse mecánicamente cuando son excitados por una tensión eléctrica, lo que se conoce como efecto piezoeléctrico inverso. Utilizando este concepto, se producen varios tipos de actuadores (Wei & Jing, 2017). Estos dos efectos pueden establecerse utilizando ecuaciones de acoplamiento piezoeléctrico como se detalla a continuación.

$$S = S^E T + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2)$$

En este sentido, S y D son vectores de deformación y desplazamiento eléctrico, respectivamente. T es la tensión, E es el campo eléctrico, S^E es la deformación elástica, d es la matriz de coeficientes de deformación piezoeléctrica, y ε^T es la permittividad dieléctrica. Las ecuaciones (1) y (2) describen los efectos piezoeléctricos inverso y directo, según corresponde. En la matriz de coeficientes de deformación piezoeléctrica d_{ij} , los índices i y j representan la dirección de polarización y la tensión o deformación aplicada, consecuentemente. Dos modos de acoplamiento comunes utilizados en los concentradores de energía piezoeléctrica son el modo "33" y el modo "31", donde las direcciones de polarización y la fuerza aplicada pueden ser paralelas o perpendiculares (Guo & Lu, 2017).

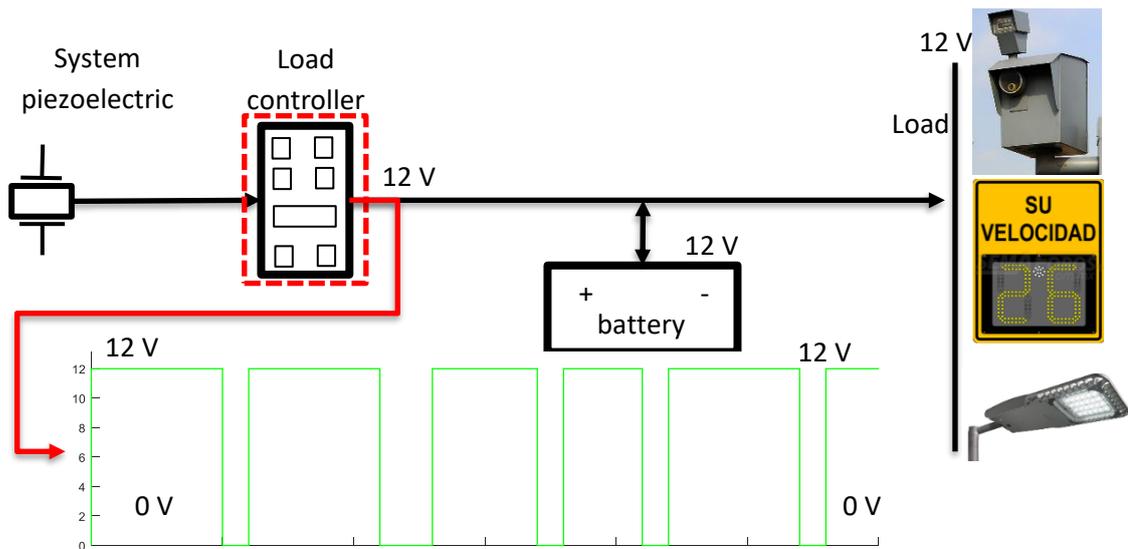


Fig. 4 Diagrama general del sistema de recolector de energía a través de un piezoeléctrico

Fuente. Elaboración propia

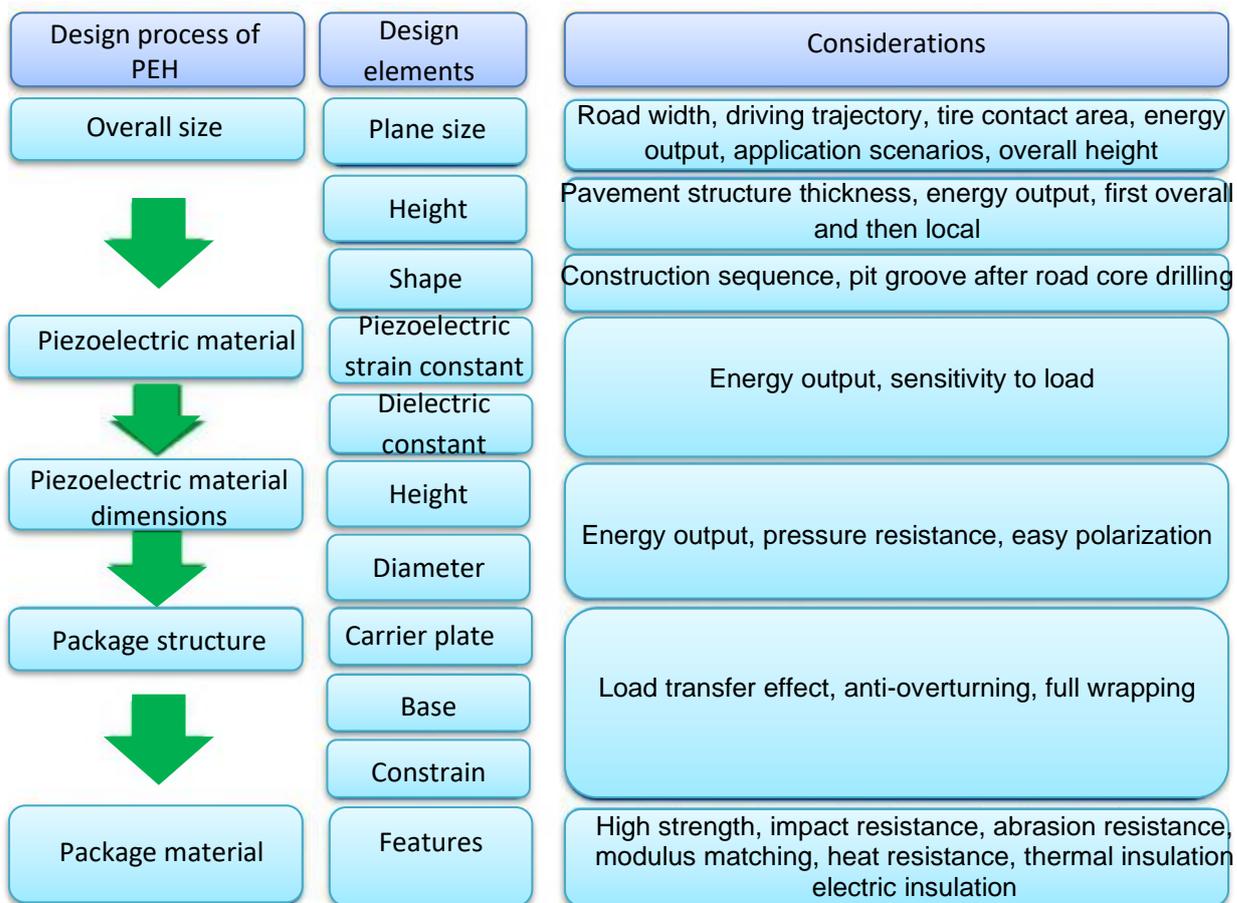


Fig. 5 Estructura para un eficiente diseño del piezoeléctrico

Fuente. Elaboración propia

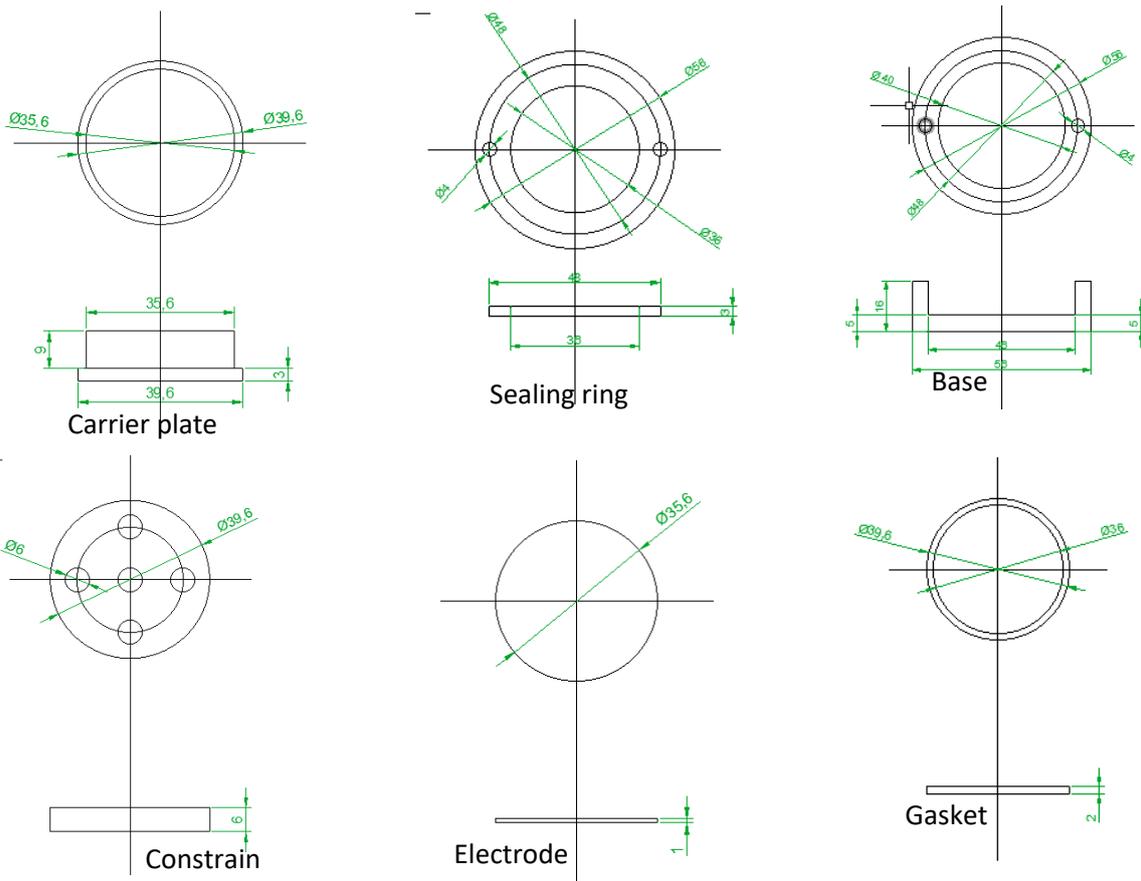
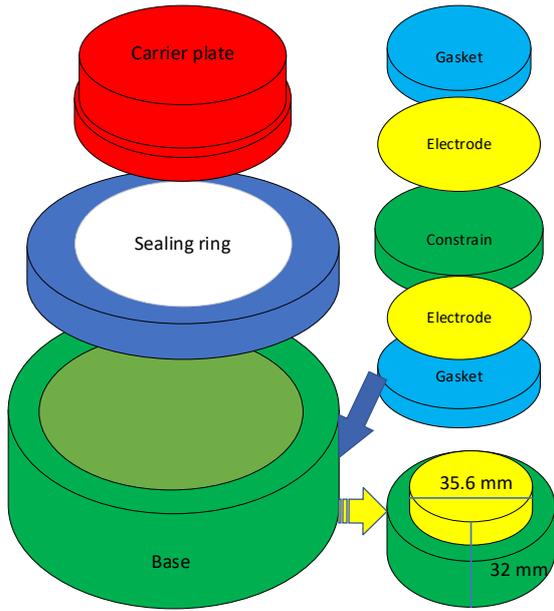


Fig. 6 Prototipo constructivo de un dispositivo piezoeléctrico PZT-5H

Fuente. Elaboración propia

3.2 Modos de acoplamiento

Los modos 31 y 33 son los dos métodos de acoplamiento más conocidos de la piezoelectricidad. En el modo 31, el material piezoeléctrico genera energía eléctrica principalmente a partir del desplazamiento transversal. La productividad es máxima cuando el portador vibra con su frecuencia de resonancia. Por otro lado, en el modo 33, la productividad energética de un recolector aumenta linealmente con la tensión aplicada a lo largo de la dirección de polarización del material. Los conceptos del modo 31 y 33 se ilustran en la Fig. 7.

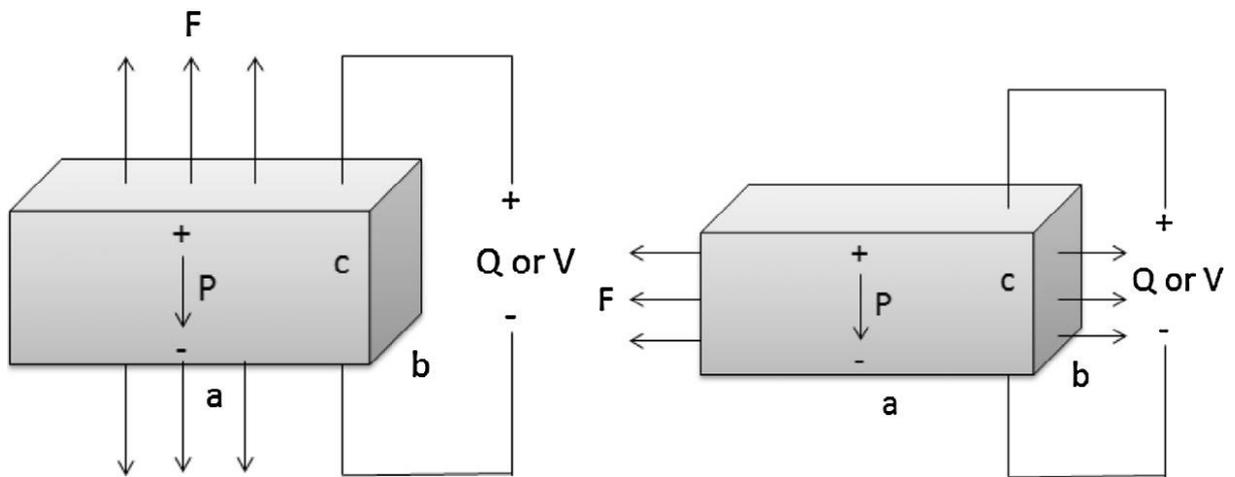


Fig. 7 Modos de acoplamiento 33-(izquierda) y 31-(derecha) de la captación de energía piezoeléctrica.

Fuente. (Lecerf et al., 2022)

En (Niasar et al., 2020) se compara la productividad de los captadores de energía en los modos 31 y 33 y se ha llegado a la conclusión de que, en el modo 31, el material piezoeléctrico es más eficiente cuando convierte cargas/fuerzas/deformaciones de bajo nivel en energía eléctrica. Cuando el material está sometido a una carga superior, como la inducida por vehículos en movimiento, la versión es más eficiente en el modo 33. Cuando el recolector recoge energía bajo una carga mayor, como la inducida por vehículos en movimiento, la configuración en el modo 33 es más eficiente y duradera. A partir del trabajo descrito en (Lecerf et al., 2022), la amplitud de vibración de una viga excitada por los automóviles de pasajeros se puede expresar por la Ecuación 3.

$$y(t) = 0.01 * \sin(\omega_b t) \quad (3)$$

Donde

$$\omega_b = v \left(\frac{km}{hora} \right) \left(\frac{1}{0.006 km} \right) \left(\frac{hora}{36} \right) \left(\frac{2\pi rad}{ciclo} \right) = 0.2909v rad/s \quad (4)$$

En la ecuación 3, v representa la velocidad del vehículo en km/h e y representa la amplitud de excitación, que varía con la frecuencia de excitación ω_b , y el tiempo t . Dado que se concluye que la productividad de un recolector de energía en el modo 31 es proporcional a la amplitud de excitación. En este sentido, la potencia de salida del recolector depende de la velocidad del vehículo. Bajo tráfico aleatorio, la potencia de salida cambiará sinusoidalmente. Para tener una salida de potencia más estable y una conversión de energía eficiente, los recolectores de energía piezoeléctrica se desarrollan en base al modo 33.

3.3 Simulaciones en diferentes condiciones de tráfico vehicular

Para investigar el efecto de la frecuencia de la carga mecánica, el tamaño de la carga y la resistencia de la carga eléctrica en el rendimiento de salida de los dispositivos recolectores de energía piezoeléctricos (PZT), se realizó una serie de experimentos de carga mecánica utilizando calibradores (kN) (Fig. 8). El dispositivo se utiliza para simular varios tamaños de carga y frecuencias de carga de tráfico en el tráfico real, y un osciloscopio registra la respuesta electromecánica del elemento piezoeléctrico.

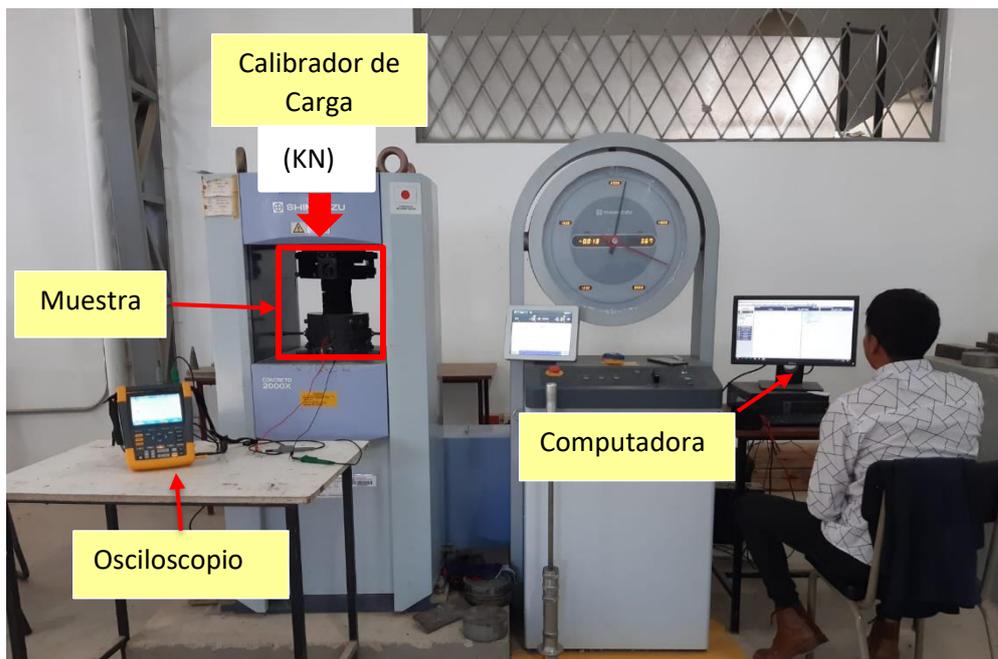


Fig. 8 Laboratorio de pruebas

Fuente. Elaboración propia

Tabla 1 Especificaciones técnicas del Piezoeléctrico

Característica	Descripción
El Diámetro	35mm
Tamaño	35x35x0.5mm
Peso	5g
Frecuencia de resonancia	6.8 (+/-) 0.7 KHZ
Impedancia de resonancia	<=300 Ohms
Capacidad estática	15000 (+/-) 30%PF
Voltaje	1.5 -30V
Temperatura de operación	-20°C - 70°C

Fuente. Elaboración propia.

Cuatro elementos piezoeléctricos se distribuyen circunferencialmente en un radio de $d = 100$ mm dentro del dispositivo circular (Figura 10). Este diseño permite que todos los elementos piezoeléctricos estén completamente cubiertos por el área de carga de la abrazadera del probador, asegurando que todos los elementos estén sujetos simultáneamente a magnitudes de carga uniformes con la misma frecuencia. Por lo tanto, se puede despreciar la influencia de la tensión distribuida en el dispositivo y la influencia de la profundidad de enterramiento del elemento piezoeléctrico en la captación de energía. (Zhang et al., 2019).

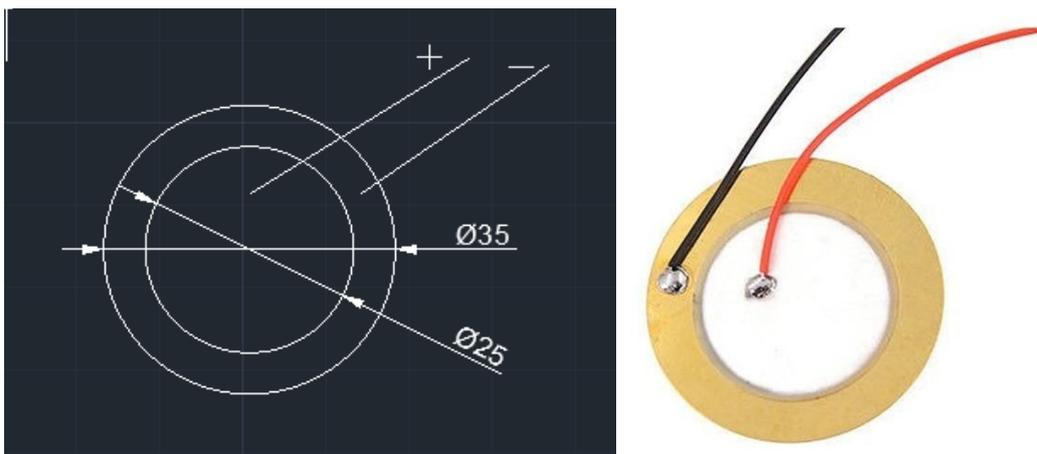


Fig. 9 Dimensión del dispositivo Piezoeléctrico.

Fuente. Elaboración propia

3.3.1 Proceso constructivo

- a) Adquisición de material Piezoeléctrico DZS y el Pavimento
- b) Soldadura de cable
- c) Preparación del modelo prototipo a pequeña escala
- d) Compactado en caliente del pavimento
- e) Colocación del Piezoeléctrico a 5cm de la superficie
- f) Compactado para formar un bloque cilíndrico
- g) Reposo del bloque antes de ser retirado del molde
- h) Prototipo colocado en el calibrador de carga
- i) Configuración del dispositivo (peso y la velocidad)
- j) Obtención de todos los datos y curvas a través del osciloscopio (Fluke 190-204 scopemeter)

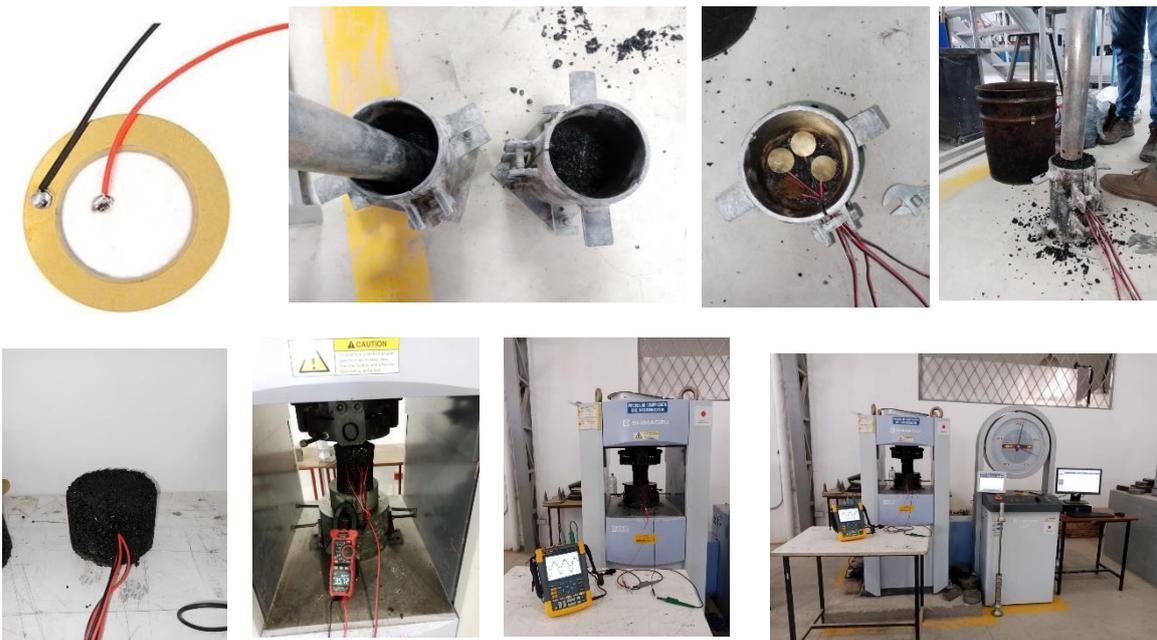


Fig. 10 Preparación y construcción del prototipo a pequeña escala

Fuente. Elaboración propia



Fig. 11 Prototipo final de forma cilíndrica

Fuente. Elaboración propia

3.4 Estructura asfáltica

Los pavimentos de asfalto suelen constar de cuatro partes: capa asfáltica, base, subbase y subrasante, como se muestra en la Figura 12. Los captadores de energía piezoeléctricos suelen colocarse dentro de la capa asfáltica, cerca del suelo a una profundidad de 5cm.

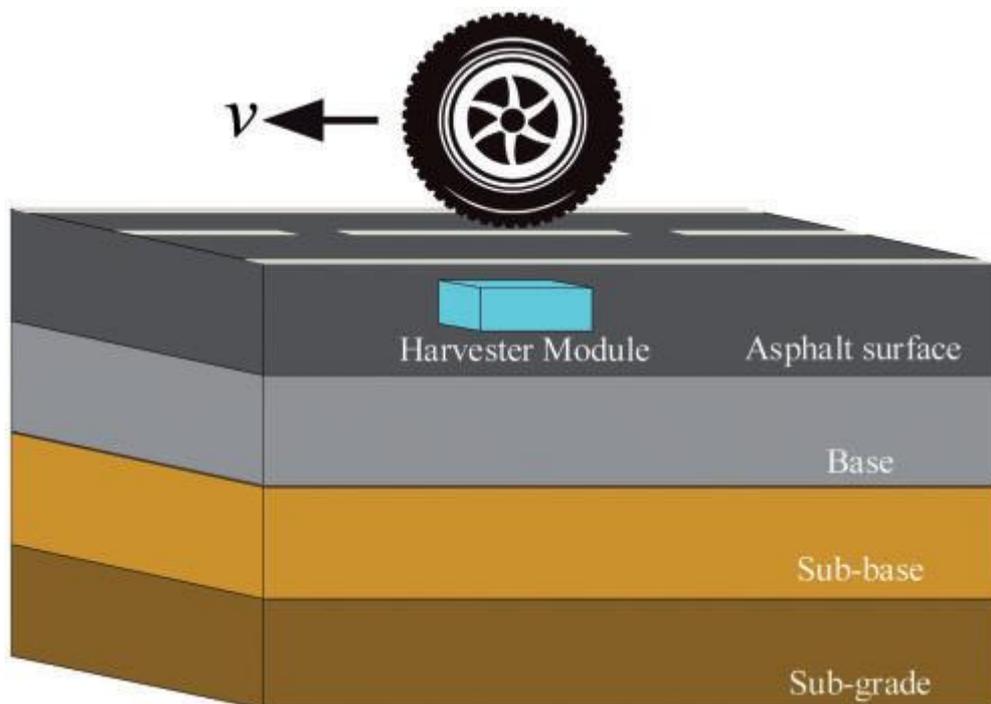


Fig. 12 Estructura típica de pavimento asfáltico.

Fuente. (Lecerf et al., 2022)

En (Roshani, 2016), se sugiere que la profundidad de empotramiento del prototipo piezoeléctrico de 2,5 a 5 cm es adecuada debido a la textura de la superficie superior, el impacto de los neumáticos en el prototipo y la proporción de tensión vertical transferida al prototipo. Los valores de las cargas aplicadas por los vehículos sobre el pavimento se recogen en la bibliografía. Por ejemplo, Xiong y Wang²⁹ evaluaron una cosechadora compuesta por discos piezoeléctricos utilizando cargas reales por eje de camión en un rango de 45,8-67,6 kN, mientras que las cargas reales aplicadas sobre los discos piezoeléctricos se situaron entre 4,8 y 11,4 kN. Esto se debe a la existencia de una relación de transmisión media del 14,43% de la carga aplicada sobre la superficie de la carretera a los discos piezoeléctricos.

3.5 Posibilidad de generar sistemas híbridos

La mayoría de los estudios sobre la recolección de energía del pavimento de las carreteras se centran en una sola fuente de energía (energía térmica, vibración mecánica) (Gholikhani et al., 2020), pero un enfoque híbrido de recolección de energía puede hacer retroceder a un único recolector, como los recolectores intermitentes e inconsistentes (Engineering & 2019, 2019). Los sistemas de energía híbridos garantizan que la energía eléctrica esté disponible incluso si falta una de las fuentes de energía ambientales. Además, la potencia de salida por unidad de área se puede aumentar mediante el uso de estos recolectores de energía híbridos (Oh et al., 2019).

La recolección de energía de los pavimentos de las carreteras comúnmente consiste en la conversión de vibraciones mecánicas, gradientes térmicos u otras fuentes de energía ambiental en energía eléctrica. La mayoría de estos estudios se basan en una sola de estas fuentes para convertir energía. La combinación de vibraciones mecánicas y gradientes térmicos es, por tanto, una nueva forma de explorar este campo. Esta combinación forma un sistema de recolección híbrido que puede resolver el problema de la energía intermitente y potenciar la energía extraída. En esta sección, la mayoría de los enfoques presentados no fueron diseñados para recolectar energía del pavimento de la carretera. Sin embargo, estos enfoques se pueden adaptar a las condiciones del pavimento de la carretera para desarrollar nuevos modelos.

3.6 Diseño y modelado

El diseño de un sistema de recolección de energía está relacionado principalmente con su aplicación. Algunos procesos de diseño están hechos para aplicaciones humanas. Por ejemplo, en el estudio propuesto en (Oh et al., 2019), se diseña un sistema de recolección de energía híbrido flexible para convertir el calor y el movimiento humano en energía eléctrica. En el estudio, los fenómenos piezoeléctricos y termoeléctricos se explotaron

juntos. La parte piezoeléctrica recoge la energía del movimiento cinético, mientras que la parte termoeléctrica recoge la energía térmica.

Dos elementos piezoeléctricos y dos imanes permanentes componen la parte piezoeléctrica, mientras que ocho materiales termoeléctricos de tipo p representan la parte termoeléctrica.

Asimismo, en la investigación presentada en (Yoon et al., 2018) se diseña un circuito de captación de energía que también explota la energía térmica y la vibración. En su trabajo, se propuso un circuito de doble modo de apilamiento para explotar la energía mecánica aumentando la fuerza de amortiguación. Además, se desarrolló un modelo de convertidor elevador. A continuación, se incluyeron modelos eléctricos del transductor piezoeléctrico y del generador termoeléctrico para simular el comportamiento del circuito concentrador, como se muestra en la Figura 13.

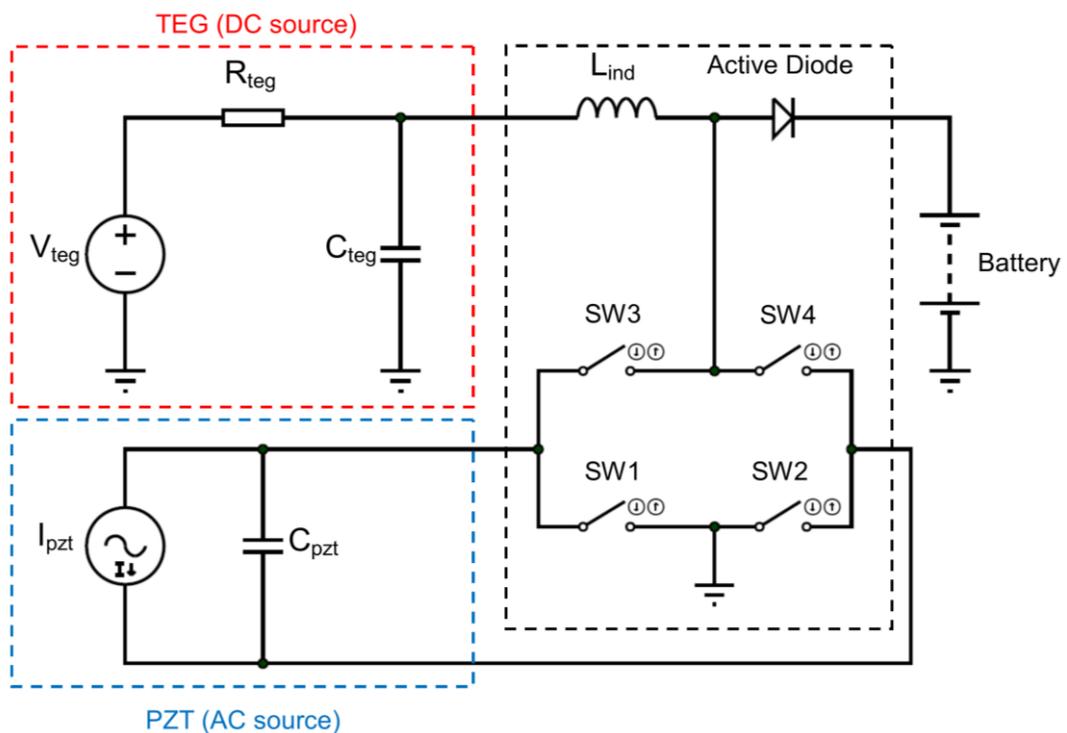


Fig. 13 Circuito recolector de energía

Fuente. (Lecerf et al., 2022)

La instalación de los sistemas TEG y RETG no tiene por qué realizarse directamente bajo el paso de las ruedas del vehículo. Lo ideal, para proteger el sistema, es instalarlo entre el paso de las ruedas y el carril lateral del pavimento de la carretera. Esta colocación seguirá proporcionando un acceso adecuado para que el sensor reciba vibraciones y calor, al tiempo que protege el sistema contra la carga continua de los neumáticos.

El transductor piezoeléctrico se modela como una fuente de CA, mientras que el generador termoeléctrico se modela como una fuente de CC. Cuatro interruptores controlados (SW1, SW2, SW3, y SW4), y un único inductor compartido (Lind), permiten que su recolector funcione tanto en modo de doble apilamiento como en modo de convertidor elevador a través de un método de multiplexación temporal. En este sentido, se evidencia una notable mejora sobre este circuito en comparación con el rectificador de puente completo básico. De manera que, la extracción de potencia del circuito recolector es un 1452% superior a la del rectificador de puente completo. Además, su colector alcanza una eficiencia de conversión del 75% con una potencia de salida de 450 μ W. La energía concentrada se utiliza para cargar una batería a partir de fuentes de energía tanto vibratoria como térmica, así como de otras fuentes de energía múltiples de baja potencia (Yoon et al., 2018).

Por su parte, el estudio presentado (Li et al., 2019) detalla el diseño de un circuito para la captación de energía piezoeléctrica y termoeléctrica. En su estudio, se concibieron modelos eléctricos de dispositivos piezoeléctricos y termoeléctricos para realizar una simulación. El circuito de captación relacionado con esos dispositivos consiste en un novedoso inductor basado en una excitación de vibración paralela-SSHI (sincronización de la captación del interruptor en el inductor), como se muestra en la Figura 14. Como resultado, el transductor piezoeléctrico se asoció con una fuente de corriente sinusoidal montada en paralelo con una resistencia y una capacitancia. Además, el generador termoeléctrico se asoció a una fuente de tensión continua montada en serie con una resistencia. De manera que, se utilizan ocho interruptores controlados (SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6, SW7 y SW8) con un inductor compartido (Lp). También se emplea un convertidor CA/CC antes de alimentar la resistencia de carga (RL).

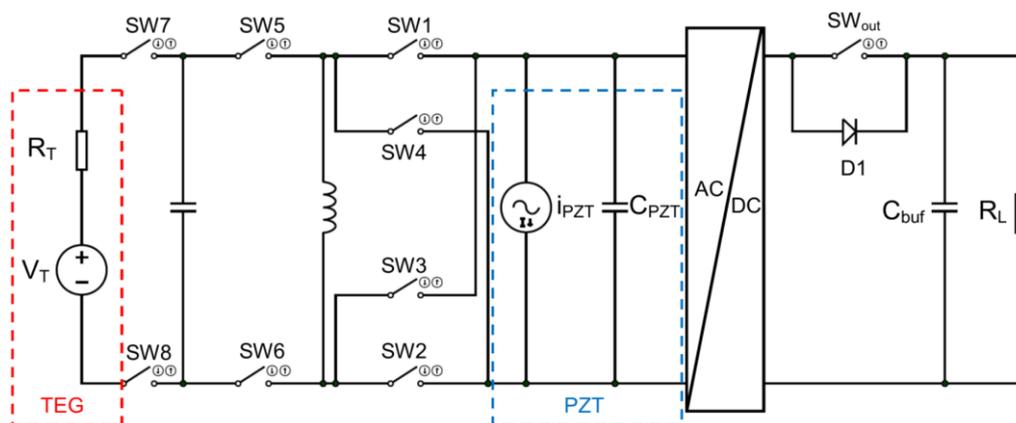


Fig. 14 Circuito de captación de energía piezoeléctrica y termoeléctrica

Fuente. (Lecerf et al., 2022)

Por otro lado, el estudio descrito en (Raut Dessai & Dessai, 2016) realiza una simulación de un recolector de energía híbrido. El método propuesto utiliza el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) con un convertidor elevador CC-CC. En función de las entradas, el circuito de control MPPT ajusta el ciclo de trabajo del convertidor CC/CC. Como resultado, el circuito de recolección de energía garantiza que la tensión de salida permanezca estable con una mejor adaptación de impedancia, de este modo se logra la máxima potencia.

La investigación propuesta en (Jella et al., 2018) propone el diseño de un nuevo concentrador basado en el uso de yoduro de plomo metilamonio MAPbI₃ y electrodos interdigitados. El sistema propuesto puede explotar la energía térmica, mecánica y solar en una única configuración utilizando MAPbI₃. Además, el dispositivo utilizado como generador piezoeléctrico proporciona 1,47 V y 0,56 μ A bajo presión aplicada periódicamente.

En el estudio descrito en (Zhou et al., 2020), se propone un recolector de energía utilizando acoplamiento termo electromecánico. En su trabajo también se estudió el circuito correspondiente. El concentrador híbrido se diseñó para la recolección de energía residual en el campo de los flujos de fluidos. Se fabricó un prototipo experimental basado en el sistema de ciclo Brayton. Este prototipo consiste en la integración de vigas de PVDF para la parte piezoeléctrica y Bi₂Te₃ para la parte termoeléctrica. También se realizó una comparación entre la disposición en paralelo y en serie para determinar la mejor configuración. Por último, su estudio mostró la posibilidad de utilizar un captador termo mecánico. Como resultado, la potencia específica por longitud del colector propuesto es de aproximadamente 55 μ W/cm en la configuración en serie.

La investigación llevada a cabo en (Kumar et al., 2019), presenta una combinación entre un módulo termoeléctrico con una película piezoeléctrica flexible para componer un sistema de recolección híbrido. En su estudio, se propuso un método de solución química simple para recolectar energía eléctrica y obtener un pequeño dispositivo flexible. Su artículo informó una potencia de salida de 1,8 nW en un intervalo de temperatura de 4 K, mientras que el nano generador piezoeléctrico proporciona un voltaje de circuito abierto de aproximadamente 4 V y genera 1,2 μ W.

El estudio propuesto en (Engineering, 2019) investigó el esquema de recolección de energía híbrida. En su investigación, las energías piezoeléctrica y termoeléctrica se combinaron para superar los inconvenientes de la recolección única, como la potencia débil, la intermitencia y la inconsistencia. Para las dos tipologías, un puente rectificador de onda completa combinado con un condensador de suavizado rectifica la salida piezoeléctrica, mientras que un convertidor elevador CC-CC aumenta la salida termoeléctrica a 5 V. Las

tipologías en paralelo y en serie se probaron cargando un banco de condensadores de 15 mF hasta 5 V. De forma consecuente, se compara el tiempo necesario para cargar completamente el condensador para las dos topologías. La Figura 15 muestra las tipologías en paralelo y en serie.

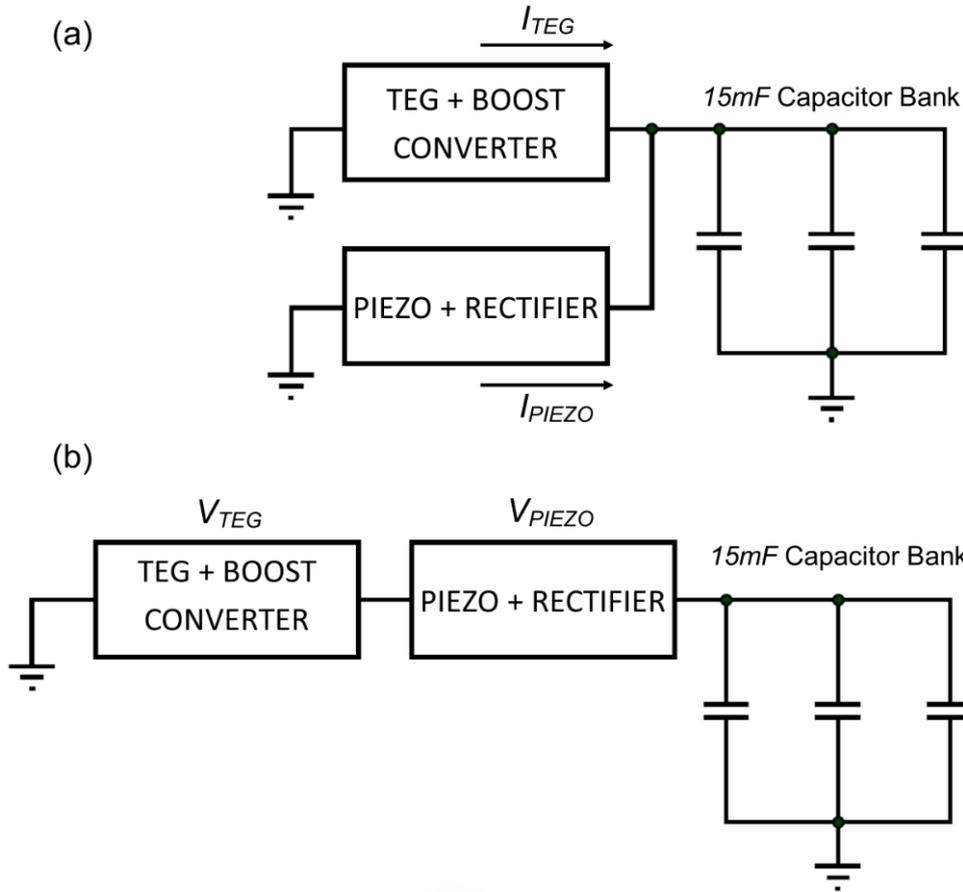


Fig. 15 Esquemas de recolección híbrida para topologías en paralelo (a) y en serie (b)

Fuente. (Lecerf et al., 2022)

I_{TEG} y V_{TEG} representan la corriente y la tensión del generador termoeléctrico, respectivamente. I_{PIEZO} y V_{PIEZO} representan la corriente y el voltaje del generador piezoeléctrico. Para la tipología paralela de la recolección híbrida, se suma la corriente eléctrica de los generadores termoeléctricos y piezoeléctricos según la Ecuación 5.

$$I_{Hybrid} = I_{TEG} + I_{PIEZO} \quad (5)$$

El voltaje general del recolector híbrido en la topología en serie es la combinación de los voltajes del recolector termoeléctrico y piezoeléctrico de acuerdo con la siguiente relación.

$$V_{Hybrid} = V_{TEG} + V_{PIEZO} \quad (6)$$

En la investigación propuesta en (Randriantsoa et al., 2022), se estudia la combinación de materiales termoeléctricos y piezoeléctricos flexibles en una sola herramienta. El objetivo de su investigación es optimizar la eficiencia de la potencia de salida acoplada del concentrador híbrido y superar los problemas de los generadores termoeléctricos y piezoeléctricos tradicionales. El dispositivo propuesto se diseñó utilizando una película delgada de nanotubos de carbono/polímero (CNT) para la parte termoeléctrica, mientras que se utilizó PVDF para la parte piezoeléctrica. Luego, se colocó un electrodo de la película piezoeléctrica en el electrodo superior, y se colocó un termoelectrico de tipo n y p intercambiable como electrodo inferior. El dispositivo híbrido también se dobla en las uniones de tipo p-n y, por lo tanto, se forma un gradiente térmico a lo ancho del dispositivo.

El voltaje termoeléctrico (V_{TEG}) se evalúa desde la tierra común hacia el lado opuesto (ambos en la parte inferior), mientras que el voltaje piezoeléctrico (V_{PEG}) se determina entre los electrodos superior e inferior, como se detalla en la Figura 16.

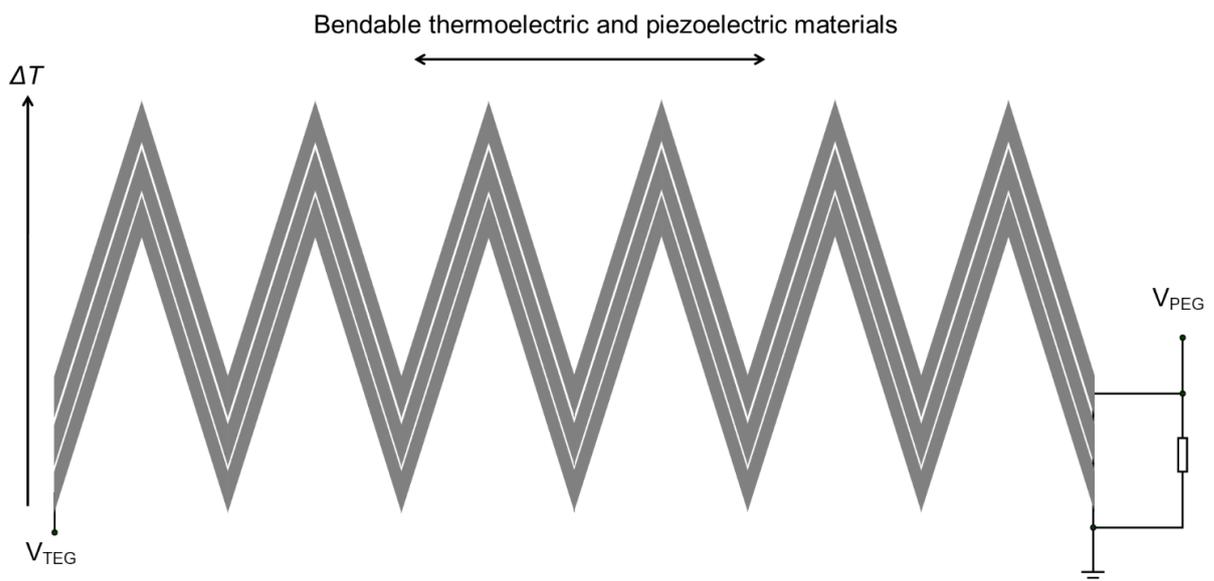


Fig. 16 Medición de voltaje del colector

Fuente. (Randriantsoa et al., 2022)

Por otro lado, el estudio técnico descrito en (Dorey, 2014) revisó películas gruesas a base de polvo piezoeléctrico y termoeléctrico para la recolección de energía. El artículo informa que el instrumento de recolección actual utiliza enfoques de fabricación semi manuales y genera mayores costos. Adicionalmente, la eficiencia de estos dispositivos actuales se reduce y presenta un importante desperdicio de material. Luego, se informaron las tecnologías más utilizadas para integrar recolectores piezoeléctricos y termoeléctricos en una película gruesa. El grosor de las películas puede variar de 2 a 200 μm . En este rango,

las películas tienen un mejor potencial de uso en el campo de las aplicaciones de recolección de energía. Como resultado, el estudio concluye que es posible fabricar películas gruesas piezoeléctricas y termoeléctricas con una densidad de potencia de 100-1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

3.7 Aplicaciones eléctricas empleando sistemas piezoeléctricos a nivel de carretera

Existe un sin número de aplicaciones que se le pueden dar en las carreteras, una de las principales es la señalización vial que es necesarias para evitar cualquier tipo de accidentes. En la siguiente grafica se observa el uso de la energía eléctrica para abastecer la necesidad de un fotoradar.

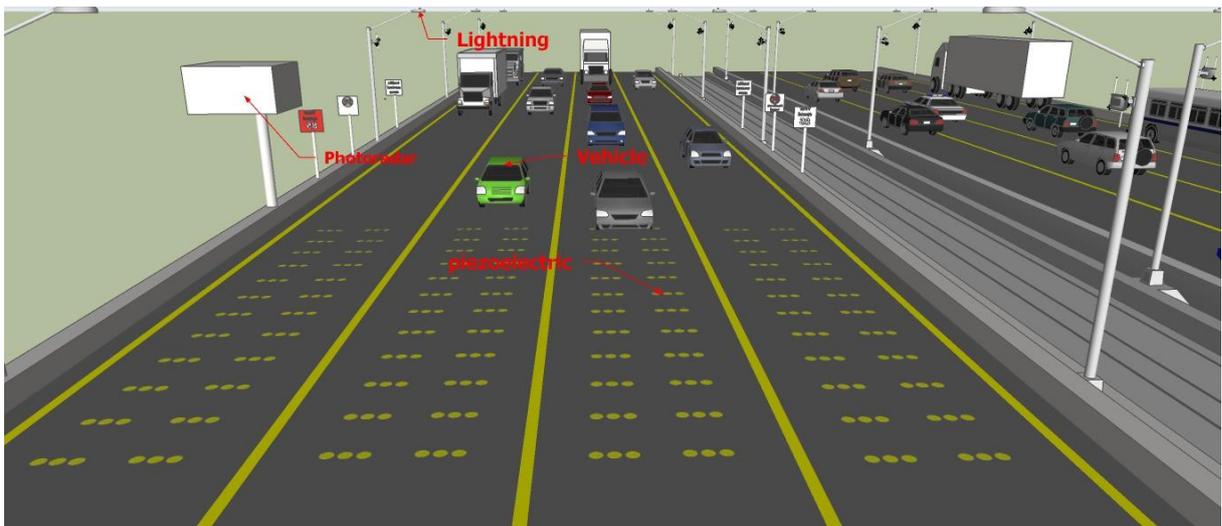


Fig. 17 Aplicación del piezoeléctrico

Fuente. Elaboración propia.

3.8 Análisis experimental

Se muestra la salida que se obtiene en distintos escenarios de carga, el tamaño de carga es de $F_N=50\text{KN}$, equivalente a un peso de un vehículo convencional. El voltaje que se obtiene depende de la frecuencia y la magnitud. En la siguiente grafica se ha experimentado ejerciendo una carga de 50kN a una frecuencia de 10Hz 7Hz 4Hz 1Hz (Velocidad del vehículo), se puede observar que estos dispositivos generan dependiendo de la carga vehicular como de la frecuencia.

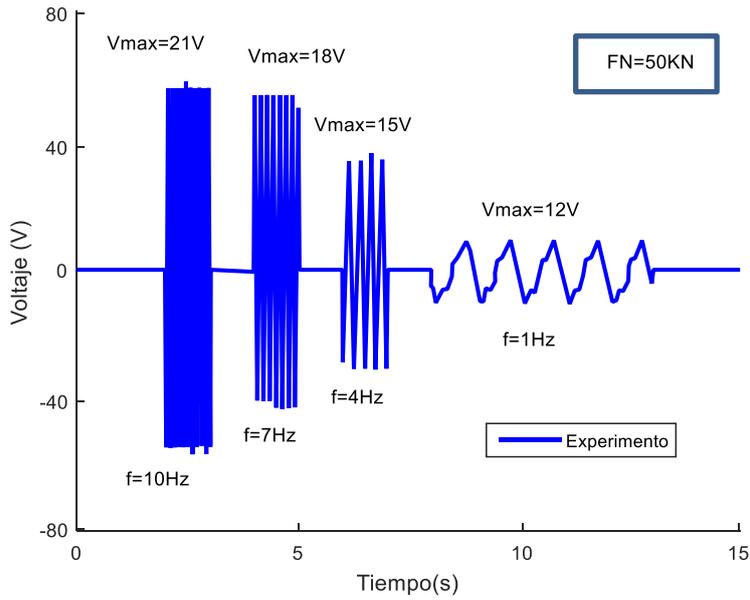


Fig. 18 Voltaje generado a una carga de 50kN

Fuente. Elaboración propia.

Efecto experimental cuando es sometido a una misma frecuencia, pero con distinta carga vehicular.

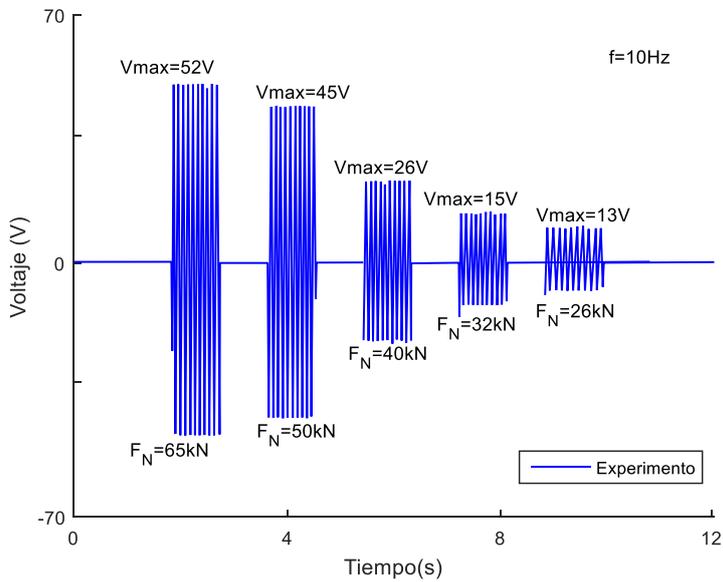


Fig. 19 Voltaje generado a una frecuencia de 10Hz

Fuente. Elaboración propia

La siguiente tabla muestra los datos de acuerdo a los registros de la EMOV. Se registra la circulación diaria en diferentes puntos:

Tabla 2 Numero de vehículos que circulan en algunos puntos

Vehículos Dirección	Buses	Camiones	Tráiler	V. livianos (autos)
Av. De las Américas Parque Jacaranda	3000	5000	1000	70000
Huayna Cápac y Calle Larga	1500	700	200	53000
Autopista redondel IEES	3000	70000	2500	60000
Av. Don Bosco y 12 de octubre	1700	1000	300	45000

Fuente. Alcaldía de Cuenca (EMOV).

Se diseño por un controlador a 12V con almacenamiento de batería de 12V para aprovechar la mayor circulación de vehículos livianos (autos) ya que se encuentran en el rango de producción de 13V, con esto se aprovecharía al máximo la producción de energía a través de piezoeléctricos.

En la siguiente tabla se demuestra la deformación provocada a distinta frecuencia y magnitud, la deformación es más visible cuando la frecuencia disminuye.

Tabla 3 Deformación de los dispositivos piezoeléctricos

Frecuencia (Hz)	Peso (kN)	Deformación (mm)
10	60	0,314
	70	0,349
7	60	0,311
	70	0,347
5	60	0,321
	70	0,356
1	60	0,359
	70	0,396

Fuente. Elaboración propia.

Efectos de varios factores en la eficiencia de recolección de energía de los elementos piezoeléctricos:

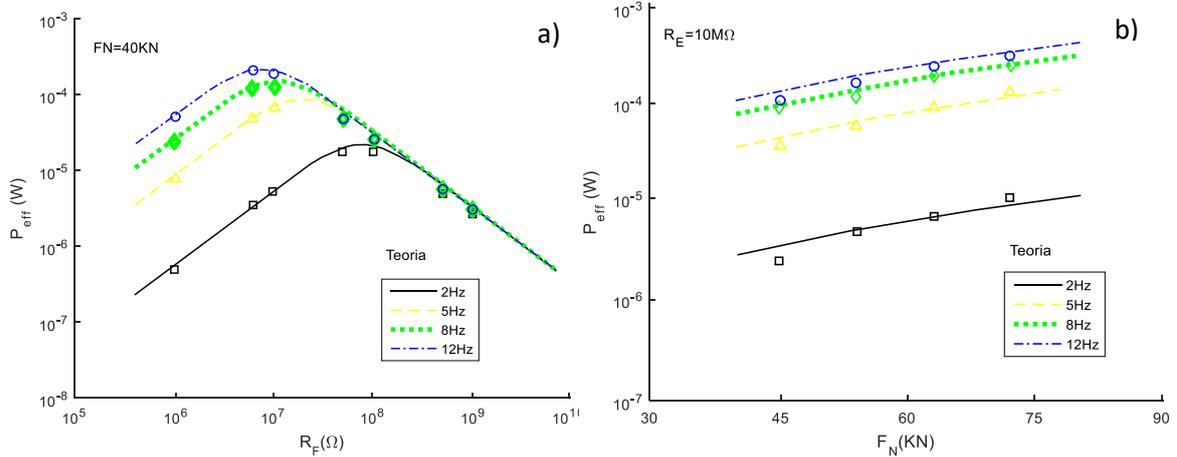


Fig. 20 a) Carga de 40kN con diversas frecuencias b) Resistencia de $10M\Omega$ a diferente carga

Fuente. Elaboración propia.

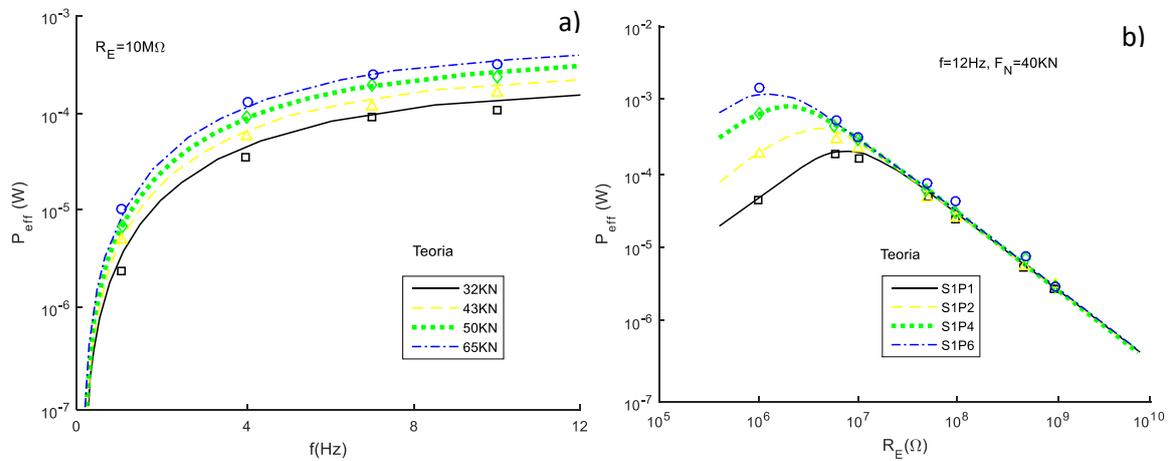


Fig. 21 a) Diferente frecuencia con una resistencia de $10M\Omega$ b) Conexiones en paralelo

Fuente. Elaboración propia.

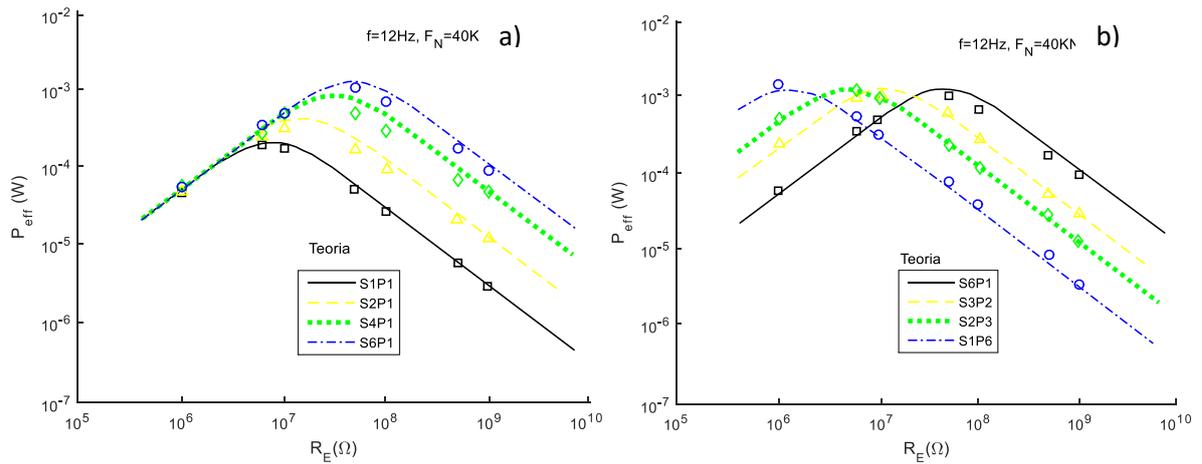


Fig. 22 a) Conexión en serie b) Conexiones en serie y paralelo

Fuente. Elaboración propia.

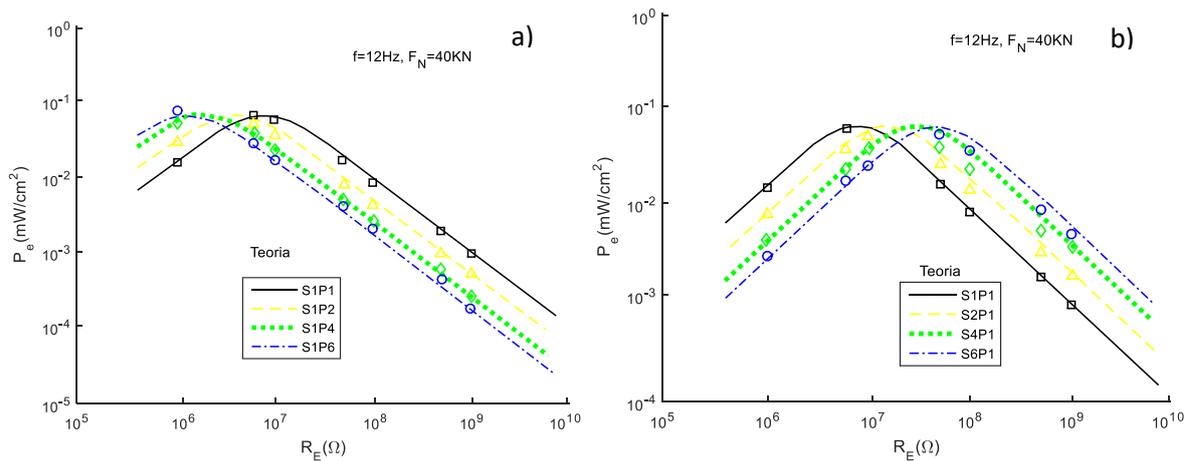


Fig. 23 a) Varios dispositivos conectados en paralelo b) Varios dispositivos conectados en serie con frecuencia y carga constante.

Fuente. Elaboración propia.

Al momento de seleccionar los dispositivos piezoeléctricos se debe tomar en cuenta que deben poseer propiedades altas en resistencia al impacto, desgaste, calor y contener aislamiento contra la lluvia.

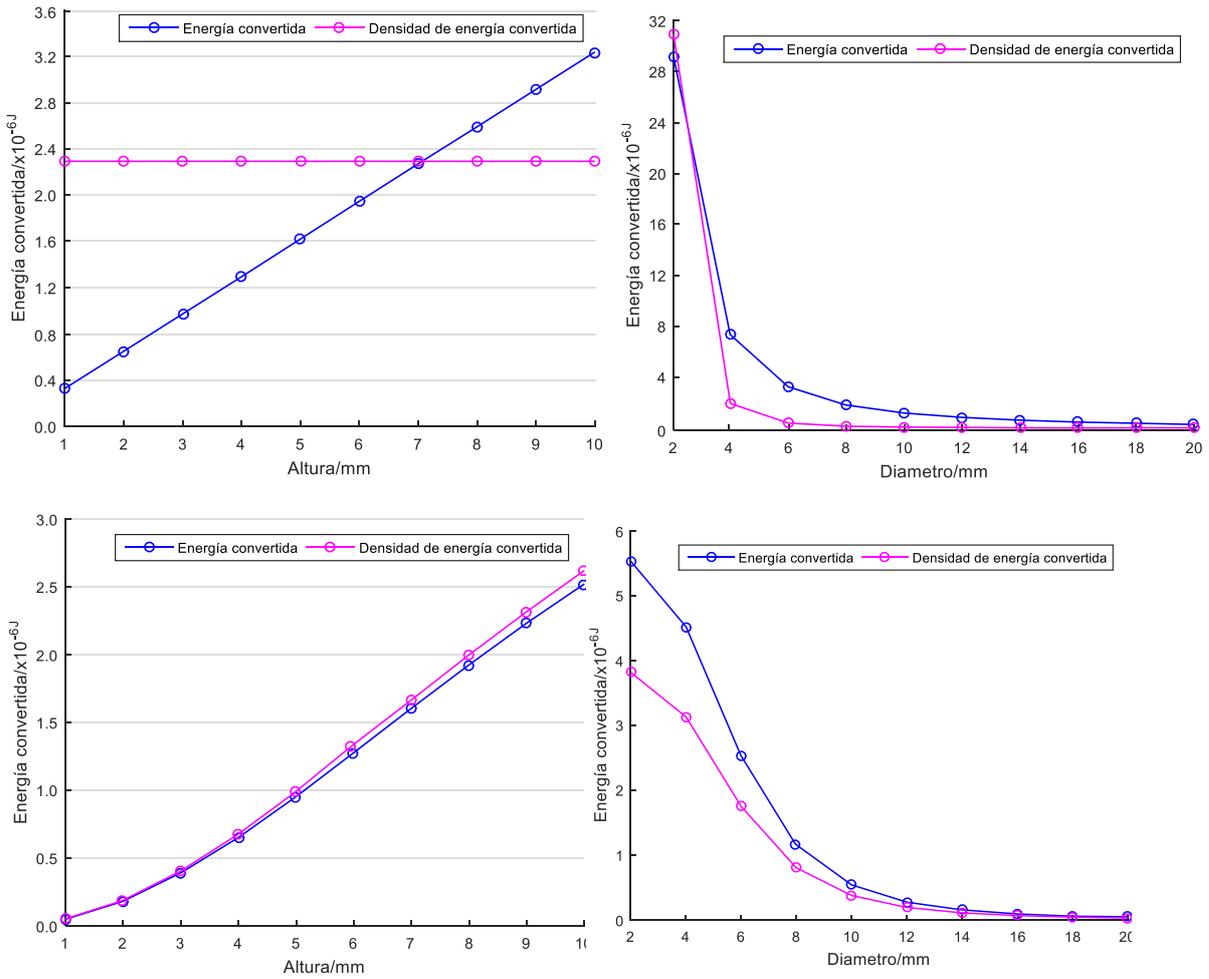


Fig. 24 Energía producida por dispositivos piezoeléctricos de distintas dimensiones.

Fuente. Elaboración propia.

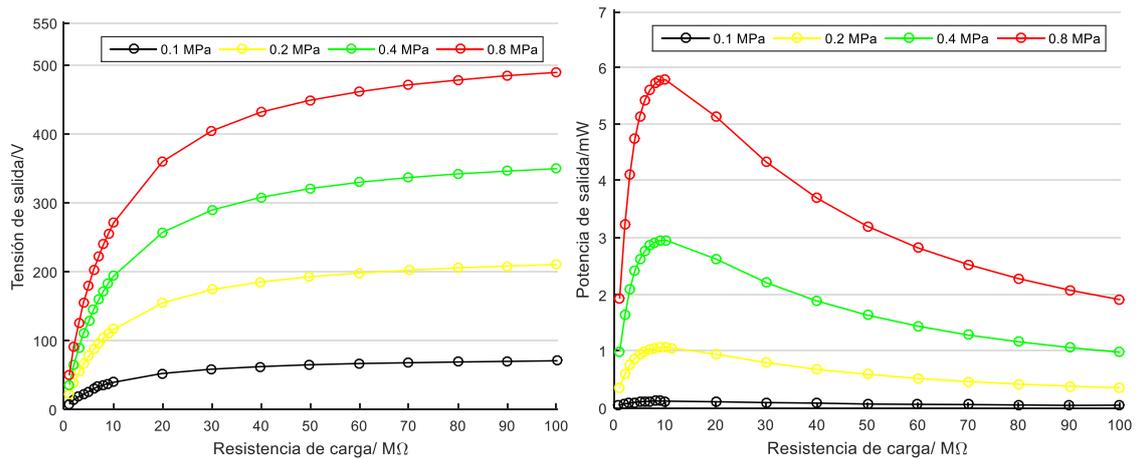


Fig. 25 Pruebas de Piezoeléctricos a distintas cargas

Fuente. Elaboración propia

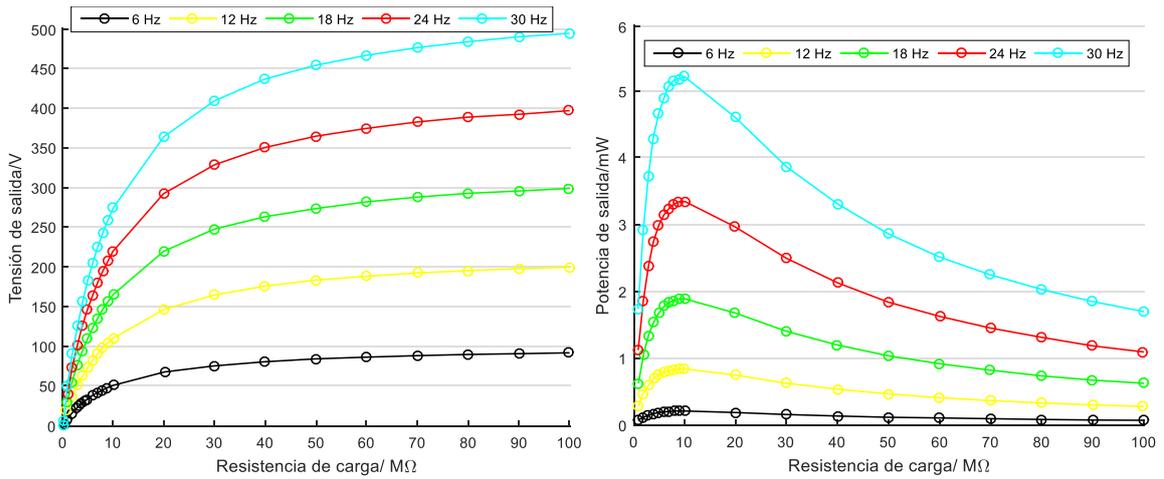


Fig. 26 Ensayos a distintas frecuencias

Fuente. Elaboración propia.

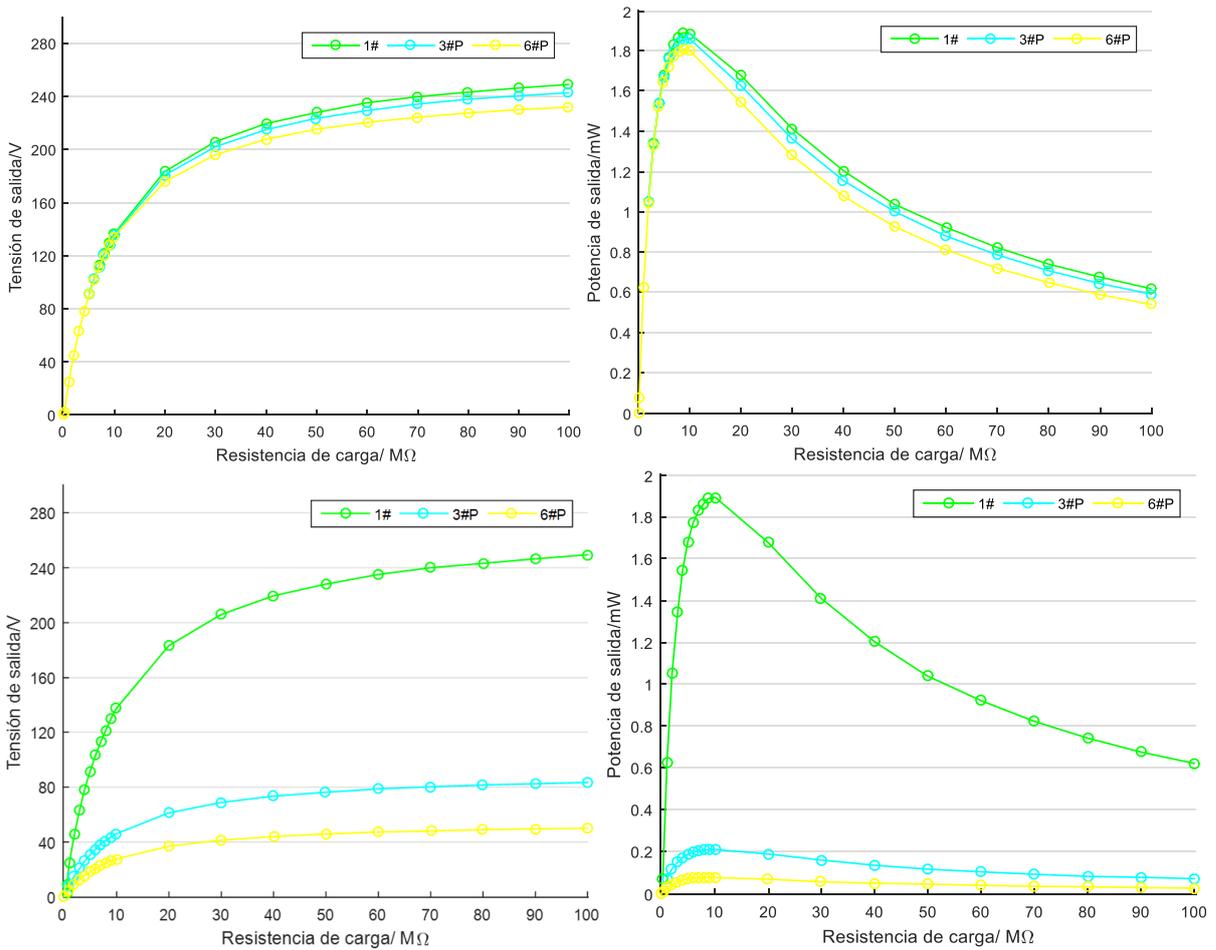


Fig. 27 Rendimiento con distintas cantidades de piezoeléctricos y diferentes metodologías de conexión

Fuente. Elaboración propia.

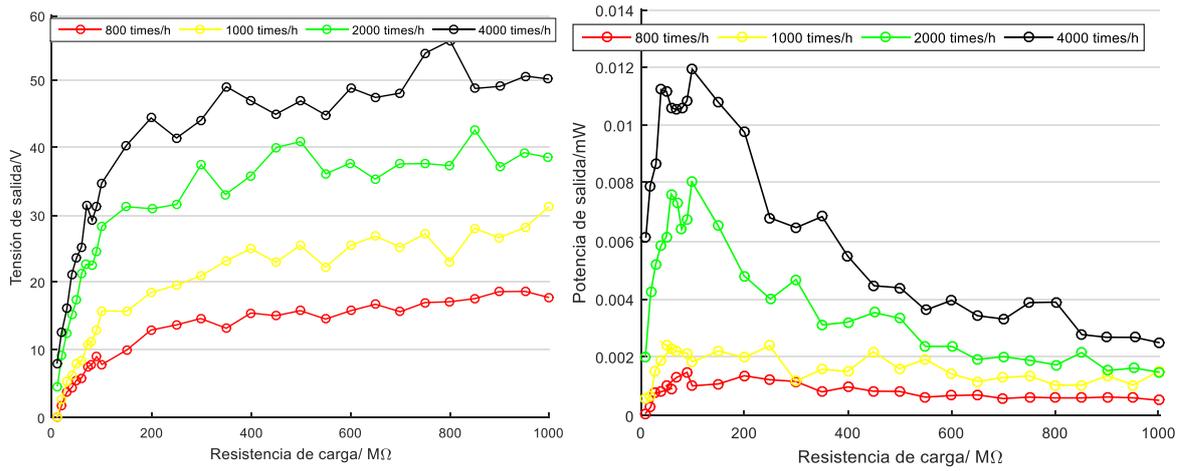


Fig. 28 Rendimiento de tensión y potencia con respecto a la velocidad del automotor con cargas grandes

Fuente. Elaboración propia.

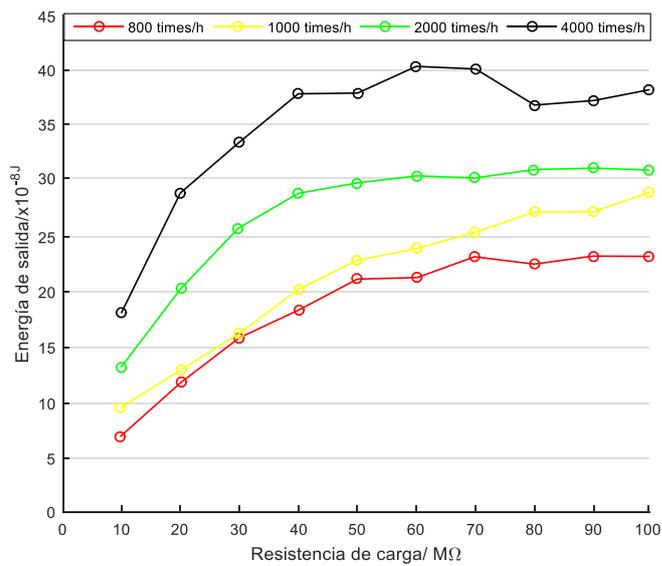


Fig. 29 Rendimiento con respecto a la velocidad del automotor con cargas Pequeñas

Fuente. Elaboración propia

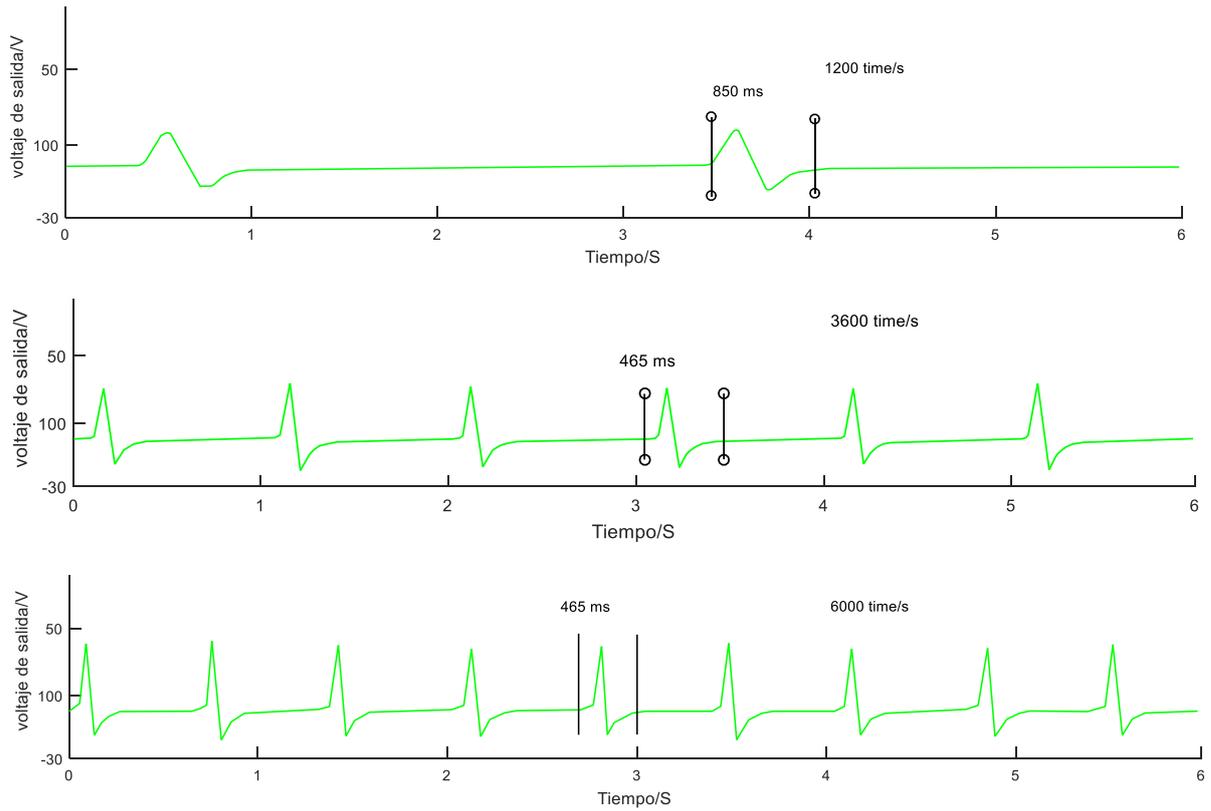


Fig. 30 Voltaje de salida a distintas velocidades con carga

Fuente. Elaboración propia.

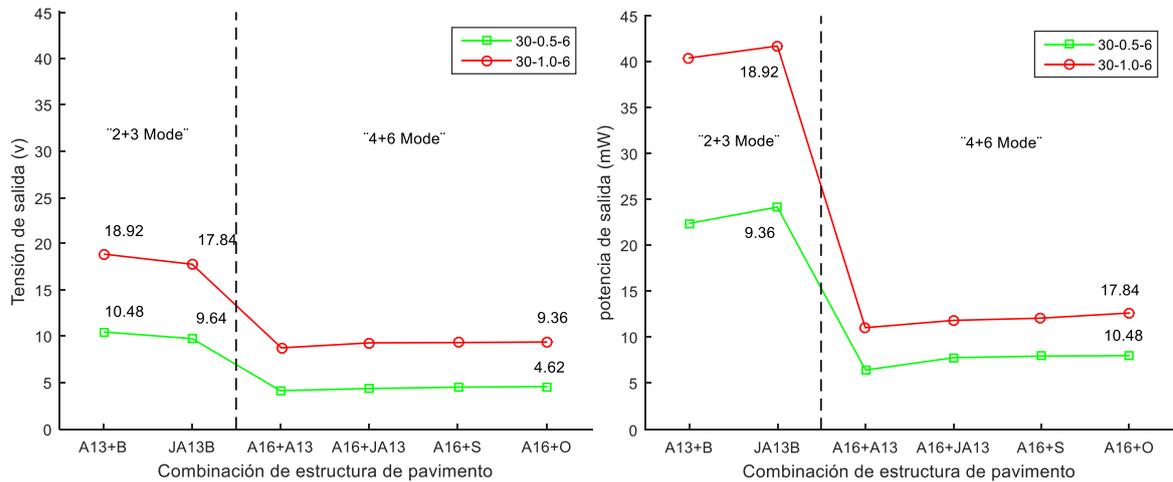


Fig. 31 Voltaje a distintas combinaciones de estructura pavimentada

Fuente. Elaboración propia.

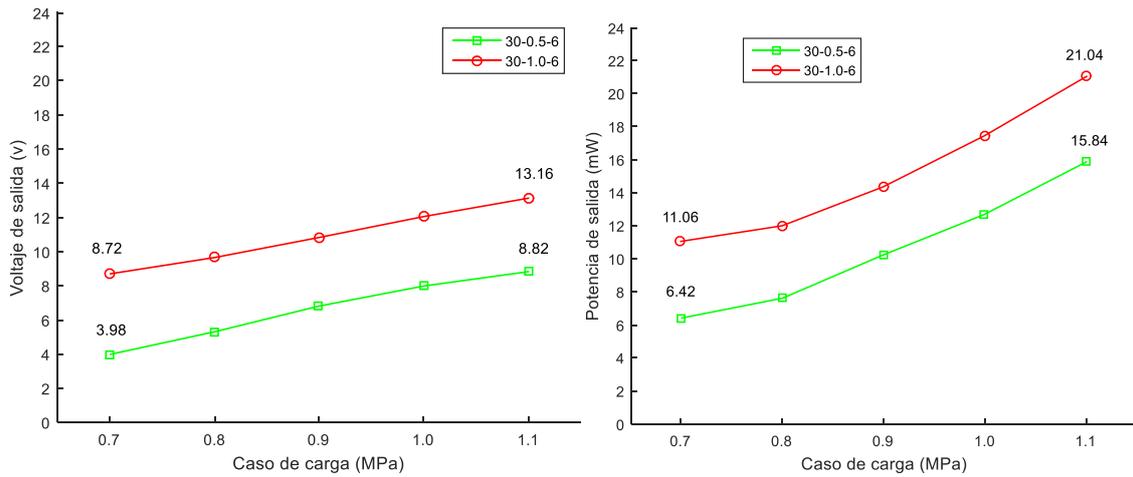


Fig. 32 Voltaje a diferentes cargas

Fuente. Elaboración propia.

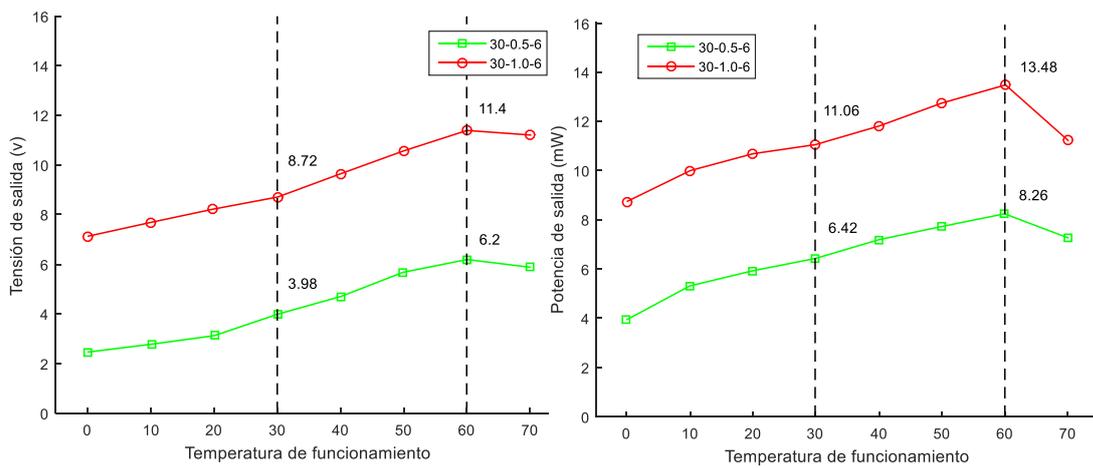


Fig. 33 Voltaje de salida a diferente temperatura

Fuente. Elaboración propia.

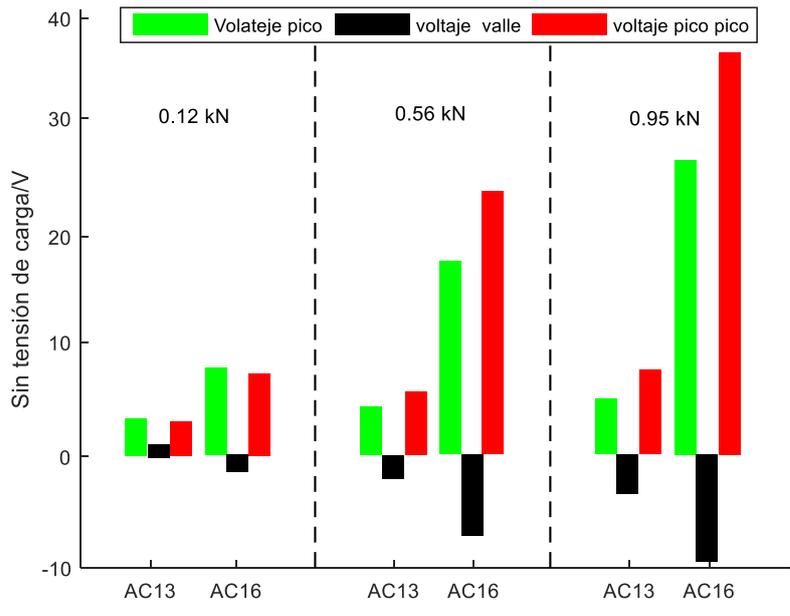


Fig. 34 Piezoeléctricos sin carga bajo diferentes tipos de pavimento

Fuente. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En el pasado no se consideraba la forma de generar electricidad según el flujo de tráfico, pero ahora es posible. Esto es gracias al continuo avance de la ciencia y la tecnología, que ha llevado al descubrimiento de nuevos materiales y con ellos diferentes formas de generar energía, siendo los materiales piezoeléctricos un ejemplo. Estos materiales son de gran utilidad para la generación de electricidad y se les ha encontrado diversas aplicaciones, desde uso doméstico, hasta equipos electrónicos en hospitales, e incluso nuestra propia indumentaria y su presencia en el desarrollo de este proyecto no es una excepción. Sin embargo, nuestra aplicación es completamente diferente a las citadas anteriormente.

Como consecuencia de esta investigación se logró el objetivo general, ya que luego de minuciosas investigaciones se logró realizar propuestas de generación de energía eléctrica por medio de dispositivos piezoeléctricos y en base a los cálculos obtenidos considerar factibles para alimentar cualquier circuito, con dispositivos de este tipo. Dándole uso en metodologías de seguridad, señalizaciones viales, como también se puede usar en sistemas de iluminación, etc.

Una de las ventajas primordiales es al momento de conversión de energía no provoca contaminantes al medio ambiente, siendo así una energía limpia. Para un uso eficiente se utiliza un regulador también conocido como controlador, Es el responsable de monitorear continuamente el estado de carga de la batería y ajustar la intensidad de carga para extender la vida útil del acumulador. El controlador registra la entrada de energía del dispositivo piezoeléctrico a la batería, regula la tensión a 12V esto evita que el voltaje excesivo dañe la batería y los dispositivos conectados.

Cabe mencionar que cuando se emplea un pulso a un dispositivo piezoeléctrico, la generación de energía eléctrica es proporcional a la fuerza aplicada. Sin embargo, a medida que se instalan más elementos piezoeléctricos, esta fuerza se distribuye entre los elementos añadidos, lo que significa que cada elemento genera menos energía. Por tanto, se puede concluir que colocar muchos elementos piezoeléctricos no es una solución para aumentar la energía generada. Tener múltiples piezoeléctricos ayuda a distribuir la carga mecánica en el sistema, sin embargo, tener varios significarán que están "infrautilizados".

En la actualidad, se están ejecutando más investigaciones para mejorar la eficacia, la optimización y la estabilidad de los dispositivos en distintos escenarios, lo que lleva al despliegue y la comercialización a gran escala de elementos piezoeléctricos.

RECOMENDACIONES

Es necesario dar seguimiento y promover la investigación sobre los materiales piezoeléctricos como generación de energía renovable, para que tenga un mayor rango de aplicación en el país, debido a que en el Ecuador no existe la información y difusión necesaria para desarrollarlo. Debido al crecimiento exponencial de la demanda de energía eléctrica y al abuso desmesurado de los recursos naturales, la energía obtenida por efecto piezoeléctrico puede convertirse en un futuro próximo en una importante fuente de energía alternativa.

Es recomendable buscar diversos materiales que tengan las mismas o incluso mejores propiedades que los utilizados en este trabajo, puedan soportar cargas de mayor peso sin llegar al punto de rotura, posibilitando la creación de diferentes métodos basados en el tráfico vehicular. Y no solo peatonal como algunos de los proyectos mostrados anteriormente que actualmente están implementados y continúan desarrollándose.

Se propone la utilización de este modelo para desarrollar futuras investigaciones, cambiando los parámetros de las propiedades del Piezoeléctricos que deben ser aptos para soportar el tránsito vehicular ya que están expuestas a diferentes presiones dependiendo del vehículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, R., Mir, F. y Banerjee, S. (2017). A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibrations and acoustic waves using piezoelectricity. *Smart Mater. Struct.* 26(8).
- Aprender Electrónica. (s.f). Aprender Electrónica. La generación de electricidad a partir de vibraciones de carretera si funciona. <https://aprenderelectronica.wordpress.com/2013/01/18/la-generacion-de-electricidad-apartir-de-vibraciones-de-carretera-si-funciona/>
- Burbano Barahona, J. F. (2021). Implementación de un prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de una baldosa con elementos piezoeléctricos. Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C.
- Cao, Y., Li, J., Sha, A., Liu, Z., Zhang, F., y Li, X. (2022). A power-intensive piezoelectric energy harvester with efficient load utilization for road energy collection: Design, testing and application. *Journal of Cleaner Production.*369.
- Chandra, R., y Mohammed, S. (2015). Un enfoque para generar electricidad a partir de vibraciones. Surathkal, India.: *Elsevier*.
- Chila Pacheco y Chong Proaño. (2019). Diseño sostenible para la eficiencia Energética de iluminación utilizando efecto piezoeléctrico en Los bloques. FIIC DE LA ULVR. Guayaquil. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/3058>
- Chu, J. (14 de Septiembre de 2011). MIT News. A new MEMS device generates energy from small vibrations: <http://news.mit.edu/2011/power-from-vibrations-0914>
- Creswell, J.W. (2013). Research Design: Qualitative, Quantitative and Mixed Methods Approach. 4th Edition, SAGE Publications, Inc., London.
- Díaz, A. I. (s.f) Materiales Piezoeléctricos: Cálculo y simulación del circuito equivalente de un cristal de cuarzo.
- Domínguez Chinchilla, D. y González Pino, A. (2018). Estudio de factibilidad de un colector de energía piezoeléctrico, como implementación de una tecnología limpia, aprovechando la circulación de personal en la entrada de la UFPSO. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Colombia.
- Du, S. et al. (2017). A new electrode design method in piezoelectric vibration energy harvesters to maximize output power. *Sensors Actuators a Phys.* 263, pp. 693–701.
- Ertruk, A. e Inman, D.J. (2011). Piezoelectric Energy Harvesting. *John Wiley & Sons*.

- Estrada Gasca, C.A. (2013). Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia. *Revista Mexicana de Física.* 59(2)
<https://www.redalyc.org/pdf/570/57030971010.pdf>.
- Fadhil, N., Saber, D. y Patra, P. (2013). Energy harvesting using nano scale dual layers PVDF film for blood artery, en 9th Annual Conference on Long Island Systems, *Applications and Technology*, LISAT 2013.
- Fundación Española para la ciencia y la Tecnología. (2010). Materiales Piezoeléctricos. *ICONO*, 3.
- Howells, C. A. (2009). Piezoelectric energy harvesting. *Energy Convers. Manag.* 50(7), pp. 1847–1850.
- Kaur, S., Graak, P., Gupta, A., Chhabra, P., Kumar, D. y Shetty, A. (2016). Effect of various shapes and materials on the generated power for piezoelectric energy harvesting system. *AIP Conf. Proc.* 1724.
- Galindo Ceballos, M. y Prado Rodríguez, H. (2018). Diseño del sistema de iluminación vial de la recta Cali-Palmira con el uso de generadores piezoeléctricos. Cali.
- Gari M., (2010). Estudio sobre el empleo asociado al impulso de las energías renovables en España. *Instituto Sindical de Trabajo Ambiente y Salud*. España.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (sexta ed.). McGraw-Hill.
- Huang, K., Zhang, H., Jiang, J., Zhang, Y., Zhou, Y., Sun, L. y Zhang, Y. (2022). The optimal design of a piezoelectric energy harvester for smart pavements. *International Journal of Mechanical Sciences.* 232.
- Ibós, O. B. (s.f). Sistema piezoelèctric d'energy harvesting per l'enllumenat d'evacuació d'emergència d'un edifici. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25398/PFC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jabbar, H., & Do Hong, S. (2017). Circuito de micro-potencia sostenible para energía piezoeléctrica. *Integrated Ferroelectrics*, pp. 193-209.
- Jiménez Rubio, F. A. (2018). Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting (Recolectores de energía) basados en piezoelectricidad. Bogotá.
- Kholerman, S. (2012). Vida+Verde. Energía generada por vehículos en movimiento: otra fuente renovable: <https://vidamasverde.com/2012/energia-generadapor-vehiculos-en-movimiento-otra-fuente-renovable/>
- Lee, H., Jang, H., Park, Jeong, J., S., Park, T., y Choi, S. (2013). Design of a Piezoelectric Energy-Harvesting shock absorber system for a vehicle, *Integr. Ferroelectr.*, 141(1), pp. 32-44.

- Martin Marmcrona, A. (2018). Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Merino, L. (s.f.). *Energías renovables para todos*. https://www.energias-renovables.com/ficheroenergias/productos/pdf/cuaderno_GENERAL.pdf
- Minazara, E., Vasic, D. y Costa, F. (2014) Piezoelectric generator harvesting bike vibrations energy to supply portable devices.
- Newman, M. (2002). Assortative Mixing in Networks. *Magazine Physical review letters*. 8(20). Department of Physics, University of Michigan. <http://www.uvm.edu/~pdodds/files/papers/others/2002/newman2002a.pdf>
- Nuñez Culqui, M. A. (2018). Aprovechamiento de la tecnología piezoeléctrica para la generación de energía eléctrica en la pista de baile de la discoteca la Cayet – Distrito de Soritor – Departamento de San Martín.
- Ortiz Orozco, M.F. (2022). Propuesta para la implementación de baldosas piezoeléctricas como alternativa energética para el Centro Comercial Santafé en Bogotá D.C. Bogotá.
- Orrego, S., Shoele, K., Ruas, A., Doran, K., Caggiano, B., Mittal, R., & Hoon, S. (2017). Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag. *Applied Energy*, 194, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.016>.
- Park, J., Lee, S. y Kwak, B.M. (2012). Design optimization of piezoelectric energy harvester subject to tip excitation. *J. Mech. Sci. Technol.* 26(1). pp. 137-143.
- Paulo, J. y Gaspar, P. D. (2010). Harvesting Methods for Portable Medical Devices. *Review and Future Trend of Energy*.
- Pedersen, C. B. W., Buhl, T. y O. Sigmund (2001). Topology synthesis of large-displacement compliant mechanisms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50(12), pp. 2683–2705.
- Pelfini, Fulget, & Beling, 2012- Pelfini, A., Fulget, G., y Beling, A. (2012). *La energía de los emergentes: innovación y cooperación para la promoción de energías renovables en el Sur Global*. Buenos Aires: FLACSO.
- Pirisi, A., Grimaccia, F. y Mussetta, M. (2012). An innovative device for Energy Harvesting in smart cities, en Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 *IEEE International*, pp. 39-44.
- Pita del Águila, N. E., Torres Rengifo, S. K., Valderrama Acosta, S. y Vega Soria, A. (2019). Implementación de un sistema piezoeléctrico y fotovoltaico para la obtención de energía limpia en la Universidad Nacional de Ucayali. Ucayali. <https://es.scribd.com/document/414519682/Clave>

- Psoma, S. D., Tzanetis, P., & Tzourlidakis, A. (2017). ScienceDirect Symposium on Flexible Organic Electronics A practical application of energy harvesting based on piezoelectric technology for charging portable electronic devices. *Materials Today: Proceedings*, 4(7), 6771–6785. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.004>
- Rodríguez Murcia, H. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de Ingeniería*. (28). <https://doi.org/10.16924/revinge.28.11> Colombia: Universidad El Bosque.
- RutaN. (07 de Octubre de 2014). RutaN-Medellín noticias. Ahora los carros de Medellín generarán energía: <https://www.rutanmedellin.org/es/actualidad/noticias/item/treevolt-sensores-que-generanenergia-5>
- Soares dos Santos, M. P. J., Ferreira, A. F., Ramos, A., Simões, J. A. O, Morais, R., Silva, N. M., Santos, P. M., Reis, M. J. C. S. y T. Oliveira, «Instrumented hip implants: Electric supply systems», *J. Biomech.*, 46(15), pp. 2561-2571, 2013.
- Sepúlveda Orozco, E. (2014). Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico (Energy/Harvesting) Mediante Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- Shevtsov, S. y Flek, M. (2016). Random Vibration Energy Harvesting by Piezoelectric Stack Charging the Battery. *Procedia Eng*, 144, pp. 645–652.
- Shinn, L. (2018). *Definición de energías renovables y tipos de fuentes de energía renovable*. Recuperado de <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts#sec-what-is>
- Scheider Electric. (28 de octubre de 2016). Scheider Electric. http://www.controls-services.com/documents/andover_continuum_catalogue.pdf
- Scheider Electric. (28 de octubre de 2016). Scheider Electric. http://www.controls-services.com/documents/andover_continuum_catalogue.pdf
- Tamayo Zapata, D.A., y Cardozo Gutiérrez, N. K. (2017). El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Tapia, A. (21 de Febrero de 2014). Movimiento: Una valiosa fuente de energía. *Energy Management*. <https://e-management.mx/movimiento-una-valiosa-fuente-de-energia/>
- Tian, Y., Li, G., Yi, Z., Liu, J. y Yang, B. (2018). A low-frequency MEMS piezoelectric energy harvester with a rectangular hole based on bulk PZT film. *J. Phys. Chem. Solids*. 117, 2017, pp. 21–27.
- Wang, Ch., Wang, Sh., Gao, Z., y Wang, X. (2019). Applicability evaluation of embedded piezoelectric energy harvester applied. *Applied Energy*. 251.
- Xie, X. D., y Wang, Q. (2015). Energy harvesting from a vehicle suspension system. *Energy*, 86, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.009>.

- Xu, X., Cao, D., Yang, H., y He, M. (2017). Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.011>.
- Yang, H., Wang, L., Zhou, B., Wei, Y., y Zhao, Q. (2018). A preliminary study on the highway piezoelectric power supply system. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(2), 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.08.006>.

ANEXOS

Anexo 1: Datasheet de piezoeléctrico (Diaphragms)

Piezoelectric Sound Components



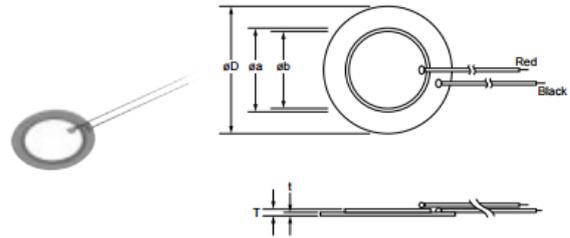
Piezoelectric Diaphragms

■ Features

1. Clear sound
2. Ultra thin and lightweight
3. No contacts: therefore, no noise and highly reliable
4. Low power consumption for voltage type

■ Applications

Clocks/Calculators/Digital camera/Various alarms
(Burglar alarms, etc.)

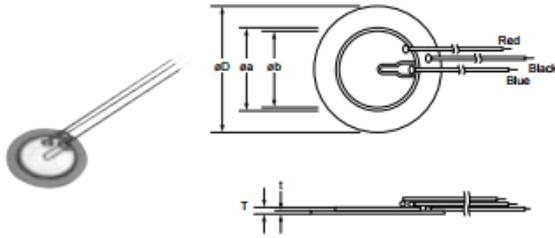


Anexo 2: Datasheet de piezoeléctrico (External Drive Type)

External Drive Type

Part Number	Resonant Frequency (kHz)	Resonant Impedance (ohm)	Capacitance (nF)	Plate Size dia. D (mm)	Element Size dia. a (mm)	Electrode Size dia. b (mm)	Thickness T (mm)	Plate Thickness t (mm)	Plate Material
7BB-12-9	9.0 ±1.0kHz	1000 max.	8.0 ±30% [1kHz]	12.0	9.0	8.0	0.22	0.10	Brass
7BB-15-6	6.0 ±1.0kHz	800 max.	10.0 ±30% [1kHz]	15.0	10.0	9.0	0.22	0.10	Brass
7BB-20-3	3.6 ±0.6kHz	500 max.	20.0 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.22	0.10	Brass
7BB-20-6	6.3 ±0.6kHz	350 max.	10.0 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.42	0.20	Brass
7BB-20-6L0	6.3 ±0.6kHz	1000 max.	10.0 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.42	0.20	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-27-4	4.6 ±0.5kHz	200 max.	20.0 ±30% [1kHz]	27.0	19.7	18.2	0.54	0.30	Brass
7BB-27-4L0	4.6 ±0.5kHz	300 max.	20.0 ±30% [1kHz]	27.0	19.7	18.2	0.54	0.30	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-35-3	2.8 ±0.5kHz	200 max.	30.0 ±30% [1kHz]	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Brass
7BB-35-3L0	2.8 ±0.5kHz	200 max.	30.0 ±30% [1kHz]	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-41-2	2.2 ±0.3kHz	250 max.	30.0 ±30% [1kHz]	41.0	25.0	23.0	0.63	0.40	Brass
7BB-41-2L0	2.2 ±0.3kHz	300 max.	30.0 ±30% [1kHz]	41.0	25.0	23.0	0.63	0.40	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7NB-31R2-1	1.3 ±0.5kHz	300 max.	40.0 ±30% [120Hz]	31.2	19.7	18.2	0.22	0.10	Nickel Alloy

Anexo 3: Datasheet de piezoelectric (Self drive type)



Self Drive Type

Part Number	Resonant Frequency (kHz)	Resonant Impedance (ohm)	Capacitance (nF)	Plate Size dia. D (mm)	Element Size dia. a (mm)	Electrode Size dia. b (mm)	Thickness T (mm)	Plate Thickness t (mm)	Plate Material
7BB-20-6C	6.3 ±0.6kHz	500 max.	8.5 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.42	0.20	Brass
7BB-20-6CL0	6.3 ±0.6kHz	800 max.	8.5 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.42	0.20	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-27-4C	4.6 ±0.5kHz	200 max.	18.0 ±30% [1kHz]	27.0	19.7	18.2	0.54	0.30	Brass
7BB-27-4CL0	4.6 ±0.5kHz	350 max.	18.0 ±30% [1kHz]	27.0	19.7	18.2	0.54	0.30	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-35-3C	2.8 ±0.5kHz	200 max.	26.0 ±30% [1kHz]	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Brass
7BB-35-3CL0	2.8 ±0.5kHz	200 max.	26.0 ±30% [1kHz]	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7BB-41-2C	2.2 ±0.3kHz	250 max.	24.0 ±30% [1kHz]	41.0	25.0	23.0	0.63	0.40	Brass
7BB-41-2CL0	2.2 ±0.3kHz	350 max.	24.0 ±30% [1kHz]	41.0	25.0	23.0	0.63	0.40	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
7SB-34R7-3C	3.1 ±0.3kHz	150 max.	24.0 ±30% [1kHz]	34.7	25.0	23.4	0.50	0.25	Stainless

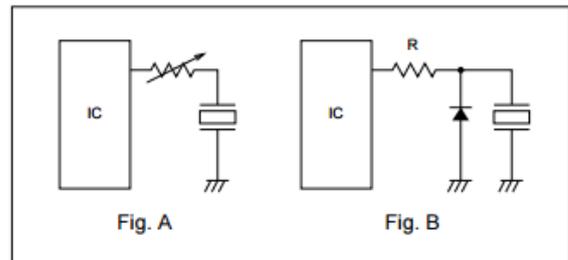
Piezoelectric Diaphragms Notice

■ Notice (Soldering and Mounting)

1. Applying load on the center area of the diaphragm may cause cracking in the ceramic element. When the diaphragm is supported by the edge, the load should be applied only around the edge.
2. Please consult with Murata or Murata representative if soldering of the component is needed.

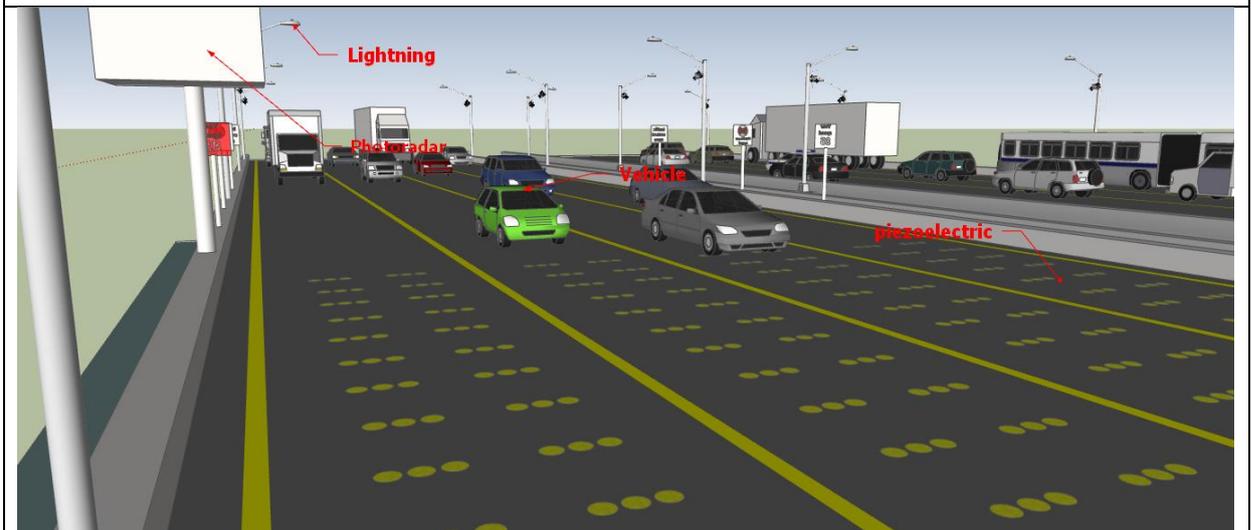
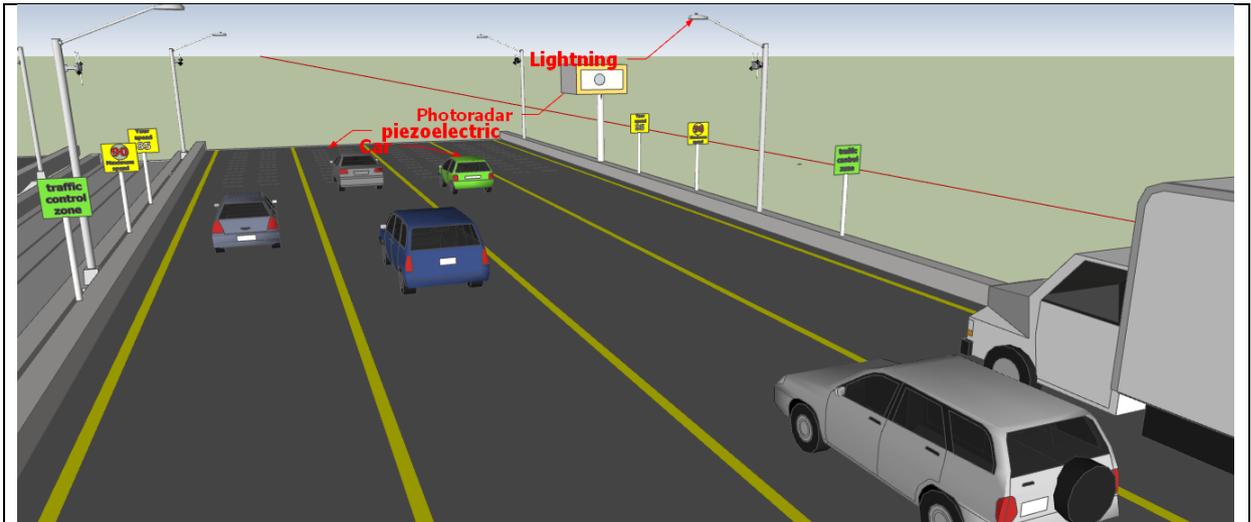
■ Notice (Handling)

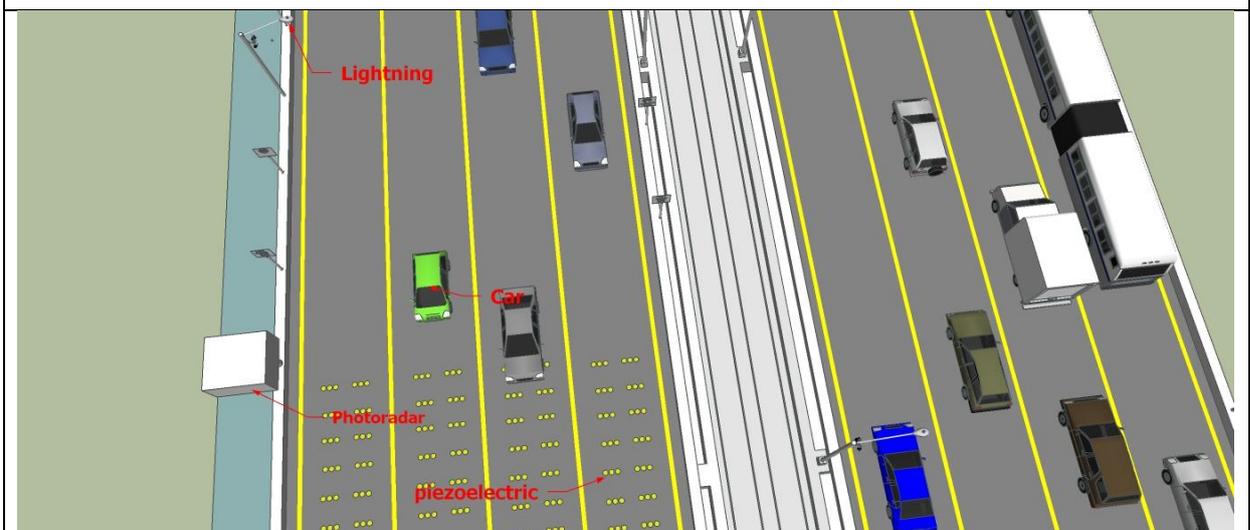
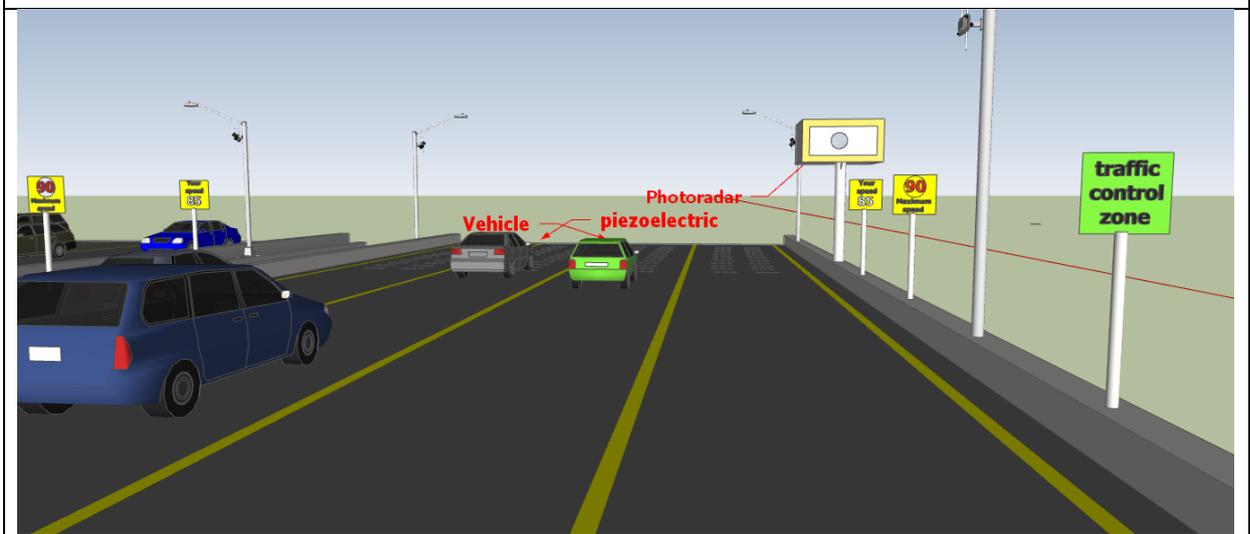
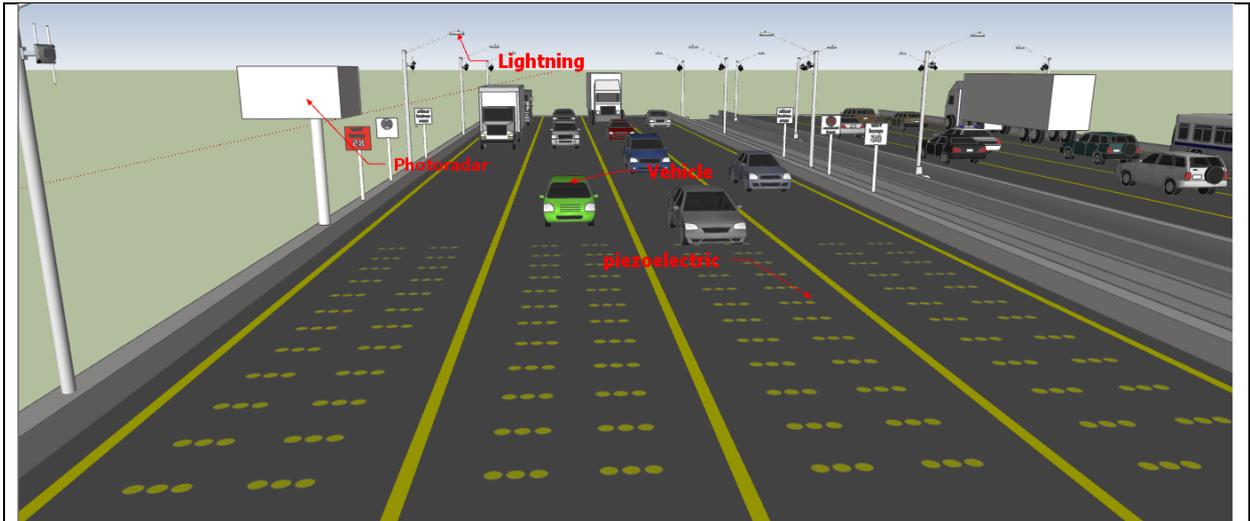
1. Please do not touch the component with bare hand because electrode may be corroded.
2. The component may be damaged if mechanical stress exceeding specifications is applied.
3. Take care to protect operating circuit from surge voltage resulting from excessive force, falling, shock or temperature change.
4. If DC voltage is applied to the component, silver migration may occur. Please pay full attention to avoid subjecting the component to DC voltage for long periods.
5. The resistor should be used as shown in Fig. A.
A suitable resistance value should be chosen, preferably $1\text{k}\Omega$ to $2\text{k}\Omega$. Instead of this measure, a diode may also be applied as shown in Fig. B.



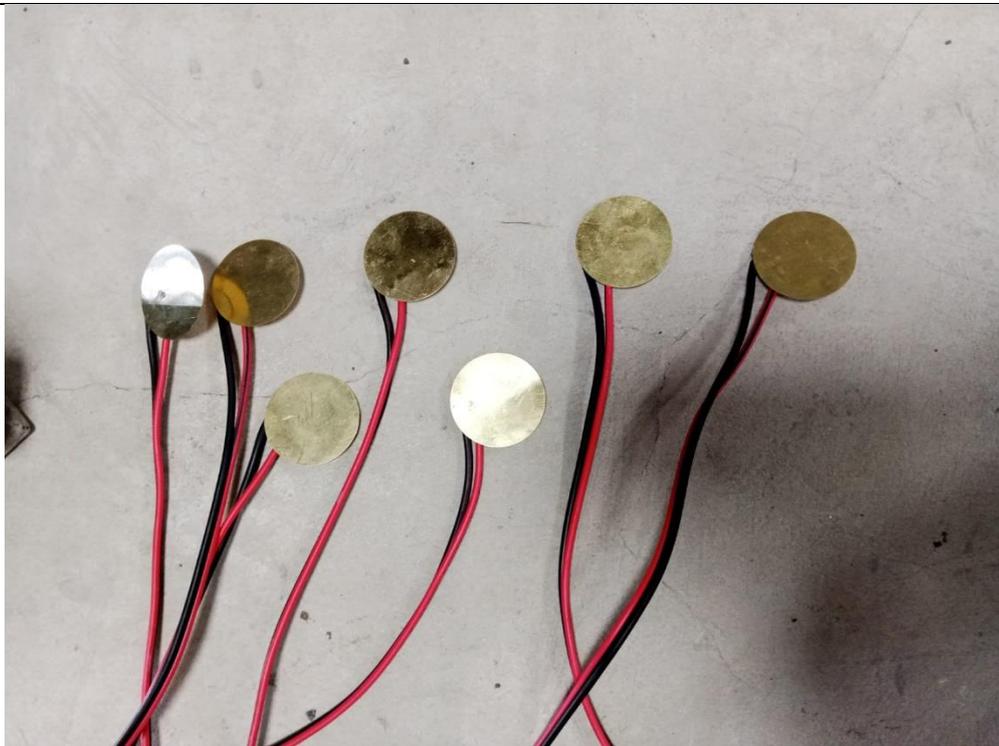
6. Avoid excessive pulling of lead wire because wire may break or soldering point may come off.

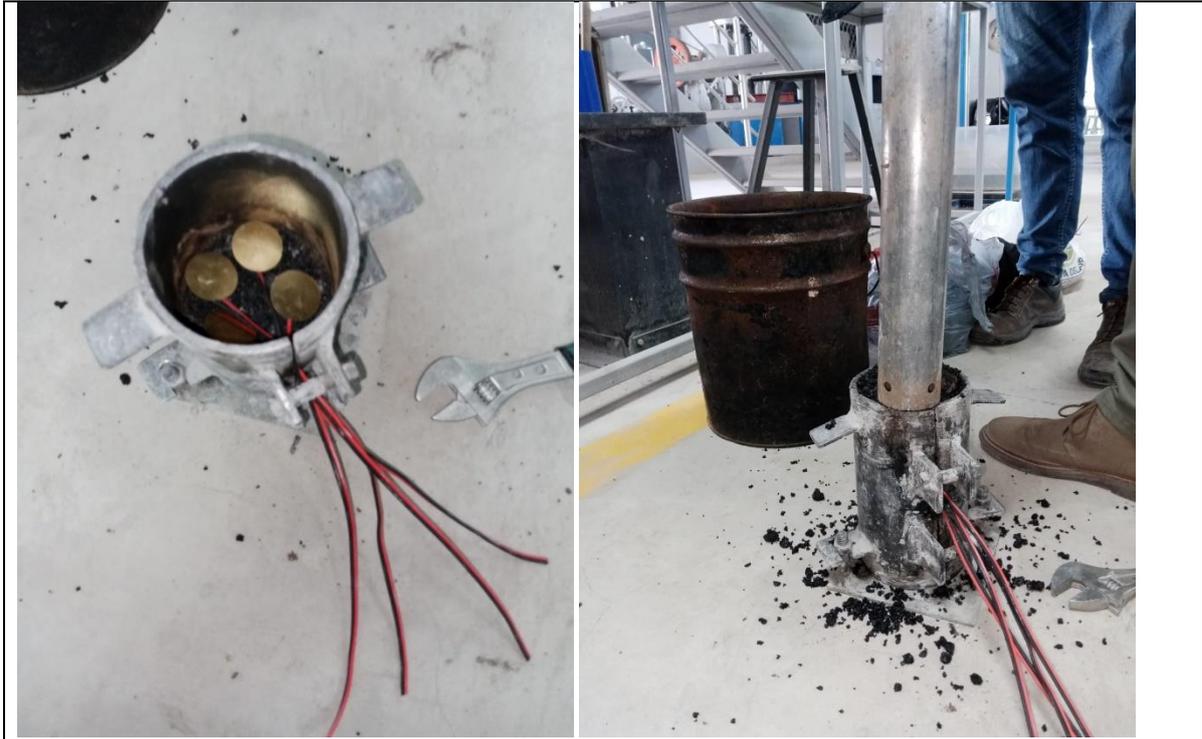
Anexo 5: Simulación en sketchup (diferentes perspectivas)

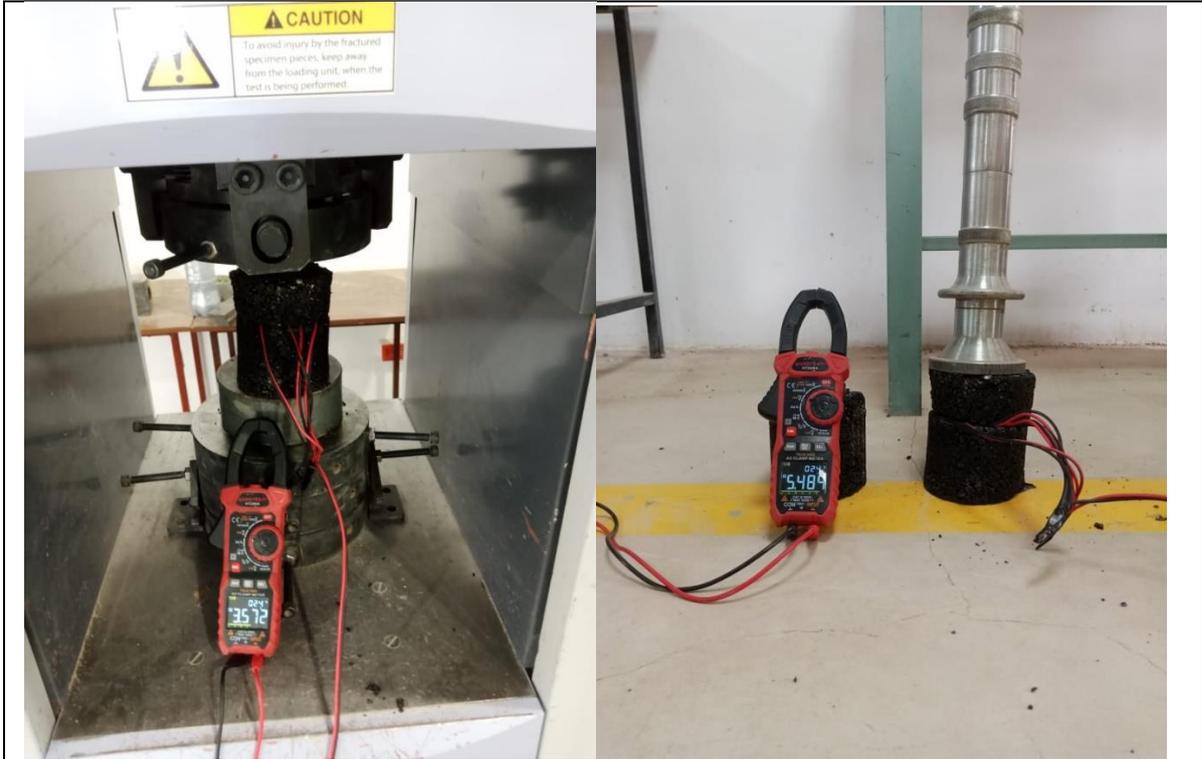




Anexo 6: Elaboración del prototipo en CIITT





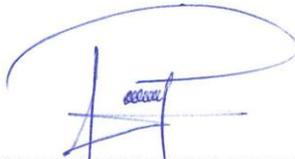




AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Jorge Luis Lalvay Lalvay portador de la cédula de ciudadanía N.º 0107479016. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico aprovechando la circulación de vehículos en estructuras pavimentadas” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de marzo de 2023



F:
Jorge Luis Lalvay Lalvay
0107479016