

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“RECOLECCIÓN DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA EN LAS CARRETERAS PARA CARGAR EQUIPOS DE BAJO CONSUMO, CALLAO 2022”

AUTOR: Dr. Santiago Linder Rubiños Jimenez

APOYO EXTERNO: Ing. Eduardo Nelson Chavez Gallegos

ADMINISTRATIVOS DE APOYO: Enit Betzabe Garcia Miranda
Luzmila Pazos Pazos

PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01 de febrero de 2023 al 31 de enero de 2024

Resolución de aprobación: 121-2023-R

CALLAO, 2023

DEDICATORIA

A Dios, por ser el que guía mis pasos
cada día, a mi Madre e

hijas, por su constante apoyo para que
luche por mis objetivos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme seguir y lograr mis objetivos, a la Universidad Nacional del Callao por ser la que me enseñó a trazar metas y gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto.

INDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	11
1.2. Formulación del problema.....	12
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos.....	12
1.4. Justificación.....	12
1.5. Delimitantes de la investigación	14
1.5.1. Delimitación teórica	14
1.5.2. Delimitación temporal	14
1.5.3. Delimitación espacial.....	14
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes: Internacional y nacionales	145
2.2. Bases teóricas.....	179
2.3. Definición de términos básicos.....	36
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	37
3.1. Hipótesis.....	37
3.1.1 Operacionalización de variable.....	38
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	39
4.1. Diseño de Investigación	39
4.2. Método de investigación.....	39
4.3. Población y muestra	45
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.	46
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.	46
V. RESULTADOS	46
5.1 Resultados inferenciales.	46
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
VII. CONCLUSIONES.....	51

VIII. RECOMENDACIONES.....	53
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	54
X. ANEXOS.....	57
10.1 Matriz de consistencia.....	56
10.2 Dimensionamiento del disco piezoeléctrico PZT	58
10.3 Dispositivo bajo prueba en una prensa.....	59
10.4 Características del multímetro	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fuerzas del neumático	24
Figura 2. parámetros piezoeléctricos.....	24
Figura 3. Las direcciones de la deformación de un material aplicando una fuerza	26
Figura 4. Sensor piezoeléctrico	28
Figura 5. Pista de baile con baldosa piezoeléctrica	29
Figura 6. Equivalencia de un circuito al material piezoeléctrico.....	30
Figura 7. Partes de una baldosa piezoeléctrica.....	31
Figura 8. Diagrama de bloque del sistema piezoeléctrico.....	31
Figura 9. Rectificador tipo puente.....	32
Figura 10. Etapa de filtrado, regulación y almacenamiento	32
Figura 11. Diagrama de flujo para implementar el sistema piezoeléctrico	33
Figura 12. Diseño general del circuito eléctrico del sistema piezoeléctrico	34
Figura 13. Diseño mecánico del sistema piezoeléctrico.....	34
Figura 14. Señales producidas por los PZTs, (a) Señal continua, (b) Señal de pulsos.....	35
Figura 15. Simulación del sistema piezoeléctrico en Simulink.....	41
Figura 16. Intersección de la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez	42
Figura 17. Circuito electrónico de la baldosa piezoeléctrica.....	43
Figura 18. Sistema mecánico externo de la baldosa piezoeléctrica.....	44
Figura 19. Sistema interno de la baldosa piezoeléctrica	45
Figura 20. Generación de energía mediante el movimiento de vehículos a diferentes velocidades y trafico	47
Figura 21. Número de vehículos y energía producida durante la semana 1	48
Figura 22. Número de vehículos y energía producida durante la semana 2	49
Figura 23. Número de vehículos y energía producida durante la semana 3	50
Figura 24. Número de vehículos y energía producida durante la semana 4	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparando las ventajas y desventajas de varias fuentes de energía	19
Tabla 2. Relación estímulo-respuesta de los materiales inteligentes	22
Tabla 3. Formulaciones de modos de operación piezoeléctrica	25
Tabla 4. Pico de potencia generado por materiales piezoeléctricos	28
Tabla 5. Operacionalización de variables	38
Tabla 6. propiedades del material piezoeléctrico (PZT 5H)	40
Tabla 7. Frecuencia mensual de tránsito vehicular, correspondiente al periodo de 4 semanas	42
Tabla 8. Energía obtenida mediante el movimiento de vehículos de diferentes pesos.....	47
Tabla 9. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 1	48
Tabla 10. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 2	49
Tabla 11. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 3	50
Tabla 12. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 4	51

RESUMEN

La investigación realizada fue de tipo aplicada, experimental. Se realizó con el objetivo de obtener la cantidad de energía producida por parte de los vehículos que transitan por el distrito de Callao. En este estudio para la simulación se consideró a los vehículos de carga ligera y pesada, que transitaban por el Callao, en zonas con alto tránsito vehicular para poder analizar si se puede cubrir la demanda energética para cargar equipos de bajo consumo eléctrico, se utilizó la simulación del sistema piezoeléctrico con Matlab, utilizando la herramienta Simulink, en esta simulación se realizó variaciones tanto en el flujo vehicular, en la velocidad de los vehículos y el peso de los vehículos para poder verificar la variación con respecto a la energía generada y posteriormente se realizaron las pruebas con el equipo implementado. Se obtuvo que en la simulación la energía mínima producida es de 5.02 kWh tomando en cuenta que el tráfico promedio es de 100 vehículos que viajan a una velocidad de 40 km/h y la mayor producción de energía es de 26.18 kWh con un tráfico promedio de 400 vehículos a una velocidad de 80 km/h y que al aumentar el tránsito de vehículos pesados la energía generada aumento de 16.52 a 22.06 kWh. Cuando se midió la acumulación de la energía con el equipo implementado se obtuvo que diariamente se obtenían entre 13.97 kW/h y 33.18 kW/h en el momento con menor flujo vehicular y el mayor flujo vehicular respectivamente

Se concluye que es importante identificar el perfil vial de la zona donde se desea implementar el sistema piezoeléctrico para poder priorizar las zonas con alto flujo vehicular para la mayor producción de energía.

Palabras claves: Piezoeléctricos, energía limpia, tránsito vehicular, simulación

ABSTRACT

The research carried out was of an applied, experimental type. It was carried out with the objective of obtaining the amount of energy produced by the vehicles that travel through the district of Callao. In this simulation study, light and heavy load vehicles were considered, which traveled through Callao, in areas with high vehicular traffic in order to analyze whether the energy demand can be covered to charge equipment with low electrical consumption, the simulation of the piezoelectric system with Matlab, using the Simulink tool, in this simulation, variations were made in both the vehicular flow, the speed of the vehicles and the weight of the vehicles in order to verify the variation with respect to the energy generated and subsequently the tests were carried out with the implemented equipment. It was obtained that in the simulation the minimum energy produced is 5.02 kWh taking into account that the average traffic is 100 vehicles traveling at a speed of 40 km/h and the highest energy production is 26.18 kW/h with an average traffic of 400 vehicles at a speed of 100km/h and that by increasing the traffic of heavy vehicles the energy generated increased from 16.52 to 22.06 kW/h, when the accumulation of energy was measured with the implemented equipment it was obtained that between 13.97 kW were obtained daily /h and 33.18 kW/h at the moment with the lowest vehicular flow and the highest vehicular flow respectively

It is concluded that it is important to identify the road profile of the area where the piezoelectric system is to be implemented in order to prioritize areas with high vehicular flow for the greatest energy production.

Key words: Piezoelectrics, clean energy, vehicular traffic, simulation

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía ha seguido aumentando con el tiempo. Por lo tanto, se puede concluir que es probable que la demanda de energía aumente aún más en el futuro. En consecuencia, los planes de conservación de energía y la implementación de tecnologías de energía renovable deben ser el énfasis de la investigación y el desarrollo en todo el mundo [1]. En la actualidad, la explotación y aprovechamiento de las fuentes de energía renovables se mantienen en apogeo, y esto no se debe únicamente a la sensibilización social por las ventajas del cuidado del medioambiente. Lo cierto es que, debido al avance tecnológico en el sector energético, cada vez es más atractivo en términos económicos, además de sostenible apostar por este tipo de tecnologías [2]. Debido a sus excelentes propiedades de conversión de energía de mecánica a eléctrica y viceversa, los materiales piezoeléctricos con alto coeficiente de tensión y carga piezoeléctrica se han probado en aplicaciones de energía renovable [3]. La piezoelectricidad es una propiedad de algunos materiales que consiste en generar voltaje eléctrico cuando se le somete a una fuerza mecánica y viceversa. Actualmente, existen diversos estudios para el aprovechamiento de este fenómeno, que van desde ladrillos especiales en la acera para peatones, puntos de presión en vías y vías férreas, hasta rompeolas especializados para zonas costeras [4].

En la actualidad, por las calles de Lima y Callao circulan unos 28,000 vehículos de transporte público, entre buses, combis y cústers. Los vehículos que circulan por las vías desprenden energía. Con los dispositivos adecuados esta energía se podría aprovechar. Esta puede venir en forma de calor producido por el contacto entre el suelo y los neumáticos o la energía mecánica que desprenden [5]. Lo que busca este estudio es determinar cuanta energía puede generarse en un tramo de perfil vial de la región Callao usando baldosas piezoeléctricas [6] como fuente de energía limpia y renovable [7], por lo cual se evalúan diferentes situaciones analizando el flujo vehicular y tipo de tránsito que se presenta en esta región para después cuantificar cuanta energía se puede generar y determinar el sistema de almacenamiento

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática.

La energía eléctrica es una necesidad básica para la humanidad y para su desarrollo. Su demanda ha ido en aumento en los últimos años debido al crecimiento de la población y de los avances tecnológicos que requieren una gran cantidad de energía. Su producción depende principalmente de fuentes de energía no renovables, los combustibles fósiles entre los cuales podemos destacar el petróleo, el gas natural y el carbón [8]. Aproximadamente un tercio de esta energía se destina a la producción de electricidad lo que genera contaminación ambiental. El 40% de la electricidad proviene del carbón, mientras que el petróleo y la energía nuclear sólo cubren entre un 12% y 15% cada una. En términos de energía consumida, la electricidad representa el 12% del total y su destino es, por igual, los sectores industrial y residencial [9]. Además del impacto ambiental, los precios de la tarifa eléctrica en el Perú siguen elevándose cada año. Los gastos incurridos por energía son muy importantes para que desarrollen las actividades cotidianas y laborales, haciendo que este sea un gasto fijo sujeto al incremento de la tarifa que establezcan las compañías proveedoras de electricidad [10].

Por ello la búsqueda de fuentes alternativas de energía es importante, ya que uno de los problemas fundamentales a la hora de conseguir el aprovechamiento energético es disponer de dispositivos que fructifiquen al máximo la configuración de los mismos [11]. La recolección de energía mecánica de las carreteras que emplean material piezoeléctrico es una forma potencial de abordar este problema, y se han diseñado diversos recolectores de energía piezoeléctrica (PEH) utilizando diferentes materiales piezoeléctricos por muchos investigadores [12]. Esta energía piezoeléctrica puede llegar a ser utilizada por dispositivos como los celulares, reproductores y led's, que requieren de bajo voltaje para su carga eléctrica, por tal motivo, se pueden emprender iniciativas de negocio como la creación de elementos piezoeléctricos que entreguen carga de bajo consumo para dichos dispositivos [13].

De lo acontecido es que nos preguntamos cómo, de qué manera, qué relación existe entre el monitoreo remoto y la adherencia a la medicación, y si esto nos permitirá dar solución a nuestro problema de investigación, es por ello que formulamos el siguiente problema de investigación.

1.2. Formulación del problema.

Problema general

¿Cómo la aplicación de la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras permitirá cargar eléctricamente equipos de bajo consumo, Callao 2022?

Problemas específicos

- ¿Cómo la implementación de la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras permitirá generar energía para equipos de bajo consumo, Callao 2022?
- ¿Cómo el uso de la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras permitirá mejorar el ahorro energético al utilizarse en equipos de bajo consumo, Callao 2022?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Aplicar la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras para cargar eléctricamente equipos de bajo consumo, Callao 2022.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras para generar energía que alimente equipos de bajo consumo
- La recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras para mejorar el ahorro energético al utilizarse en equipos de bajo consumo

1.4. Justificación

Justificación Teórica

Según [27] “Cuando en una investigación se busca mostrar las soluciones de un modelo, está haciéndose una justificación teórica.”

De acuerdo con los objetivos de estudio, su resultado permite el aprendizaje de sensores y sistemas electrónicos especializados, en la acumulación de energía eléctrica con sistemas piezoeléctricos.

Justificación Tecnológica

Según [27], “Se considera que una investigación tiene justificación práctica cuando su desarrollo ayuda a resolver un problema o, por lo menos, propone estrategias que al aplicarse contribuirían a resolverlo”.

Los resultados del proyecto de investigación posibilitan la elaboración de técnicas de enseñanza y aprendizaje para las teóricas de sensores y energía renovable.

Justificación Metodológica

Según [28] “Los sistemas de riego agrícola, que generalmente se utilizan en el campo de nuestra región y país, son en gran mayoría de control manual lo que puede provocar desperdicio de agua y energía eléctrica, sin mencionar que el riego inadecuado no alcanza el nivel óptimo de humedad. El uso eficiente del agua para el riego agrícola se puede dar con la automatización de los sistemas de irrigación.”

El presente proyecto tiene un enfoque de mejorar la generación de energía eléctrica con el fin de cargar equipos de bajo consumo y reducir costos en el consumo eléctrico, así como también en la reducción de la contaminación ambiental.

Justificación Social

Según [28] “El proyecto se justifica socialmente porque la ejecución de este moderno Sistema de Riego proporcionará una alternativa de solución ante deficiente método de riego utilizado como es el Riego Tradicional, en condiciones de salubridad con un Impacto ambiental sostenible y de esa manera beneficiará en tema agrícola y económico”.

El incentivo ambiental y económico generada por el proyecto, busca influir de forma positiva en el factor social del ciudadano, debido a que muchas veces desconocen el uso de fuentes alternativas para la producción de energía limpia y su relación en la disminución del daño ambiental.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Delimitación teórica

El presente trabajo de investigación se desarrolló algunos prototipos de fabricación propia además se hizo uso de software libres para recolectar los datos de los piezoeléctricos, lo cual permitirá verificar la producción de energía eléctrica. No obstante, la falta de investigaciones referentes al tema de investigación limitó en ocasiones, un análisis profundo de la situación actual del uso de piezoeléctricos y el aprovechamiento de la energía cinética y mecánica en las carreteras del Callao .

1.5.2. Delimitación temporal

El presente trabajo de investigación se ha realizado en el mes de febrero del 2023, el desarrollo con simulaciones y modelamientos del sistema tuvo una duración de 12 meses, el tiempo fue insuficiente para que se realizará una evaluación completa acerca de la producción de energía eléctrica en las diferentes carreteras del Perú y la influencia de la disposición geométrica de los piezoeléctricos en la producción de energía, debido a que esto ocurre en un largo periodo de tiempo.

1.5.3. Delimitación espacial

La presente investigación se realizó en el distrito del Callao y se trabajó en una de las carreteras cercanas a la universidad nacional del callao con mayor flujo vehicular

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes: Internacional y nacionales

Antecedentes internacionales

Según [3], en su trabajo de tesis titulado “IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE UNA BALDOSA CON ELEMENTOS PIEZOELECTRICOS”, para la obtención de su título profesional como ingeniero electrónico y de telecomunicaciones, tuvo como objetivo diseñar e implementar un prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de un sistema tipo baldosa con elementos piezoeléctricos, utilizando una metodología que en el primer módulo hizo un análisis de los antecedentes, continuó con el módulo de la definición de los requerimientos, con base a los antecedentes obtenidos, luego se procedió con el módulo del diseño del sistema, y el análisis del sistema propuesto y teniendo esta información se hacen las conclusiones de todo el sistema, finalmente en este trabajo se recomendó la instalación de estos dispositivos en lugares con gran afluencia de personas o transeúntes.

Según [7], en su trabajo de tesis titulado “GENERACIÓN DE ENERGÍA UTILIZANDO EL EFECTO PIEZOELECTRICO”, para la obtención de su título profesional en ingeniero mecatrónica, tuvo como objetivo diseñar y manufacturar una baldosa que genere energía eléctrica que podrá ser utilizada para encender una lámpara de LEDs con ayuda de sensores piezoeléctricos, para ello utilizó la metodología de diseño basándose en los requerimientos, especificaciones, diseño conceptual, modelos sólidos, el análisis y la manufactura de cono, finalmente el autor recomienda buscar otro tipo de tecnología que utilizara el principio de efecto piezoeléctrico de alguna manera a pesar de que no fuera para generar energía.

Según [9] en su trabajo de tesis titulado” Baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético” para la obtención de su título profesional en ingeniero mecatrónica, tuvo como objetivo diseñar un prototipo de baldosa con características piezoeléctricas, que pueda aprovechar la carga dinámica de peatones con

el fin de generar energía eléctrica para alimentar sistemas de iluminación de baja potencia, para ello utilizó la metodología que se dividió en 6 etapas, la primera seleccionar dispositivo piezoeléctrico, la segunda es la generación del diseño conceptual, la tercera el diseño del circuito para transmitir la energía generada, el cuarto es el diseño del circuito de almacenamiento, el quinto es el diseño del circuito de almacenamiento y el sexto es la simulación del funcionamiento, finalmente el autor recomienda usar estos equipos para alimentar otros tipos de máquinas o elementos que requieran de muy bajas cantidades de energía para funcionar.

Según [14] en su trabajo de tesis titulado "Estudio de elementos necesarios para la implementación de ecobaldosas en la universidad católica de Colombia" para la obtención de su título profesional en ingeniería civil, tuvo como objetivo dar una amplia información acerca de las baldosas compuestas por materiales piezoeléctricos que son más utilizadas, mostrando sus ventajas y distintos usos en el mercado dependiendo de sus características físicas, para ello utilizó la metodología que fue dividido en varias fases, que se resumen en consulta de aspectos Contextuales, Caracterización de la información recolectada, realización de encuestas y propuesta final para la implementación de las ecobaldosas, finalmente el autor recomienda realizar un prototipo de las baldosas, para tener una idea tangible y poder observar el comportamiento de los elementos dentro de la Universidad y así también reducir costos de importación, además, se recomienda continuar con este estudio cuando se presenten unas condiciones más normales y que no impidan los análisis en la planta física de la Universidad y crear modelos de interacción entre estudiantes y la Universidad, que incentiven aún más la investigación conjunta de este tipo de ideas y pensar en la posibilidad que se creen proyectos que permitan la colaboración conjunta de varios programas de la Universidad simultáneamente.

Antecedentes nacionales

Según [6] en la tesis de grado para mecánico electricista de la Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo” titulado “Generación de energía piezoeléctrica a partir de la vibración de los perfiles viales del pavimento en la región Lambayeque”, tuvieron como objetivo principal cuantificar la energía residual que se produce al pasar por el asfalto los vehículos en forma de vibración, para transformarla en energía eléctrica con un diseño de investigación descriptiva adaptativa, finalmente se recomendó seguir con las investigaciones sobre la tecnología piezoeléctrica ya que es una tecnología muy poco explotada en el país, y puede ser una alternativa energética para producir energías limpias.

Según [10] en la tesis de grado de maestría en Administración de la universidad ESAN titulada “Plan de negocio para la generación de energía eléctrica alternativa mediante el uso de baldosas generadoras de energía”, tuvieron como objetivo principal realizar un análisis de los factores externos e internos del mercado de energía renovable para demostrar una propuesta de valor al cliente, utilizando un metodología que se basa en recopilar información que permita evaluar la condición del mercado para poder introducir tanto el producto como el servicio de Instalación de Baldosas Eléctricas como Energía Eco Amigable, finalmente se recomendó crear un negocio el cual se dedique a la comercialización de baldosas generadoras de energía en el país, en Lima y Callao; el cual el servicio conste inicialmente de una consultoría comercial de acuerdo a su necesidad

Según [15] en la tesis para la obtención del título profesional en ingeniería eléctrica en la Universidad Nacional del Centro titulada “Estudio de la captación de energía eléctrica a través del efecto piezoeléctrico para aplicaciones de baja potencia”, tuvieron como objetivo principal sintetizar los conocimientos de dispositivos, métodos y circuitos para la captación de energía eléctrica a partir de vibraciones mecánicas a través de

transductores piezoeléctricos para el diseño de fuentes de energía en aplicaciones de pequeña potencia, utilizando un metodología analítica que es un tipo de investigación que se utilizará en la presente labor, en vista de que, el fin es generar energía eléctrica a partir de esfuerzo mecánico. En cuanto al enfoque, se ha de utilizado la Investigación Mixta. En la primera parte se aplicó la investigación cualitativa que se apoya en datos obtenidos por los investigadores a partir de observación o de la experimentación y posteriormente cuando se tratan de modelos para los recolectores de energía piezoeléctrica de recurrió a la investigación cuantitativa debido a que la investigación realizada está unido a la información numérica, finalmente se recomendó incorporar un tope en el diseño de la cosechadora para evitar fallas mecánicas limitando la magnitud del desplazamiento y reduciendo las tensiones de flexión

Según [16] en la tesis para la obtención del título profesional en ingeniería electrónico en la Universidad Tecnológica del Perú, titulada “Diseño de un Sistema Generador Piezoeléctrico para reducir los costos por la Alimentación Eléctrica de los Equipos Biomédicos de Emergencia en el Hospital Santa Rosa-Lima 2021”, tuvieron como objetivo principal diseñar un Sistema Generador Electrónico Piezoeléctrico para la conversión de energía por medio de la energía cinética de un motor de un elevador para alimentación eléctrica en equipos biomédicos en emergencia de un Hospital, utilizando un metodología basada en la planificación y ejecución según el PMBOOK y para un posterior análisis de los resultados obtenidos para la presentación de entregables, finalmente se recomendó utilizar estos equipos electrónicos piezoeléctricos a nivel nacional para dar soporte a zonas rurales y también eso pagar el taller en el Hospital, así como realizar un manual de procedimientos en la conversión de energía y su uso cotidiano. Además, desarrollar un sistema APP para poder monitorear la alimentación eléctrica en tiempo real y a distancia utilizando la inteligencia artificial y el internet de las cosas.

2.2. Bases teóricas

Beneficios ambientales

Desde una perspectiva ambiental, la tecnología de recolección de energía vial representa una innovación prometedora en los sistemas de transporte por carretera. La tecnología es viable y aparece como una solución para los crecientes problemas energéticos globales y la actual tendencia al agotamiento de los recursos naturales. Por lo tanto, la oportunidad de recolectar energía a partir de vibraciones mecánicas se está convirtiendo en un área de interés que ha atraído una creciente atención por parte de los investigadores. Aunque la aplicación de sistemas de captación de energía vial a gran escala aún se encuentra en una etapa embrionaria, los beneficios potenciales de la tecnología son significativos. En particular, los beneficios ambientales de esta tecnología (Tabla 1) complementan sus ventajas sociales. De hecho, en comparación con las fuentes de energía convencionales, el sistema de recolección de energía vial representa una fuente limpia de energía renovable. La tecnología está diseñada para lograr eficiencia energética (es decir, recolectar y reutilizar la energía desperdiciada en forma de tensiones o tensiones mecánicas) y, por lo tanto, es respetuosa con el medio ambiente [17].

Tabla 1. Comparando las ventajas y desventajas de varias fuentes de energía

Fuente de energía	Ventajas		Desventajas
Energías no renovables	Carbón	-Relativamente barato -Fácil de almacenar y transportar -Conveniente para el comercio	-Energía fósil -Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)/fuente de contaminación -Amenaza para la salud pública y el medio ambiente

	Gas natural	-Relativamente barato -Conveniente para el comercio	-Energía fósil -Emisión de GEI/fuente de contaminación -Amenaza para la salud pública y el medio ambiente.
	Petróleo	-Relativamente barato -Fácil de almacenar y transportar -Conveniente para el comercio -Energía líder en sistemas de transporte.	-Energía fósil -Emisión de GEI/fuente de contaminación -Amenaza para la salud pública y el medio ambiente. -Agotamiento de recursos
	Nuclear	-Fuente de energía barata -Producido bajo demanda	-Requiere alta tecnicidad, alto costo de instalación. -Altos riesgos para el público y el medio ambiente. -Reticencias sociales
Energías renovables	Energía hidroeléctrica	-Fuente de energía barata -Cero emisiones de GEI	-Depende de la disponibilidad de recursos hídricos. -No necesariamente respetuoso con el medio ambiente/riesgo de inundaciones.
	Biomasa	-Amigable con el medio ambiente -Alternativa a la energía fósil/	-Requiere terreno para producción de biomasa -Causa de la deforestación cuando se produce a gran escala.

		<p>reduce las emisiones de GEI (entre un 45% y un 65% menos)</p> <p>-Fácil de almacenar y biodegradable.</p>	
	Geotérmica	<p>-Probablemente el más barato</p> <p>-Seguro y limpio, cero emisiones de GEI.</p> <p>-Favorable al medio ambiente</p>	<p>-Riesgo de agotamiento de las aguas subterráneas</p> <p>-Riesgo de gases nocivos liberados en el aire.</p> <p>-Requiere alta tecnicidad, alto costo de instalación.</p>
	Solar	<p>-Amigable con el medio ambiente</p> <p>-Cero emisiones de GEI, seguro y limpio.</p> <p>-Adecuado al cambio climático</p>	<p>-Problema de almacenamiento</p> <p>-Dependencia del clima</p>
	Eólica	<p>-Amigable con el medio ambiente</p> <p>-Cero emisiones de GEI, seguro y limpio.</p>	<p>-Problema de almacenamiento</p> <p>-Dependencia del clima</p>
	Piezoeléctrica	<p>-Amigable con el medio ambiente</p> <p>-Cero emisiones de GEI, seguro y limpio.</p> <p>-Tecnología innovadora</p>	<p>-Problema de almacenamiento</p> <p>-Falta de esfuerzos de investigación.</p>

Introducción al efecto piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos son los que algunas fuentes denominan como “smart materials” o “multifunctional materials” (materiales inteligentes o multifuncionales). Estos son los que tienen la propiedad de

responder de forma significativa a estímulos de diferentes naturalezas como ejemplo, mecánicas, magnéticas, térmicas o luz. En la siguiente tabla, se muestra con cada tipo de material, la equivalencia entre el tipo de excitación al que se somete y la respuesta (Ver tabla 2).

Tabla 2. Relación estímulo-respuesta de los materiales inteligentes

OUTPUT INPUT	DEFORMACIÓN	CARGA ELÉCTRICA	FLUJO MAGNÉTICO	TEMPERATURA	LUZ
TENSIÓN	ELASTICIDAD	PIEZOELECTRI- CIDAD	MAGNETOSTRIC- CIÓN		FOTOELASTI- CIDAD
CAMPO ELÉCTRICO	PIEZOELECTRI- CIDAD	PERMITIVIDAD			EFFECTO ELECTRO- OPTICO
CAMPO MAGNÉTICO	MAGNETOSTRIC- CIÓN	EFFECTO MAGNETO- ELÉCTRICO	PERMEABILIDAD		MAGNETO- ÓPTICO
CALOR	EXPANCIÓN TÉRMICA	PIROELECTRI CIDAD		CALOR ESPECÍFICO	
LUZ	FOTOSTRIC-CION	EFFECTO FOTOVOLTAICO			REFRACCIÓN

Ventajas e inconvenientes de materiales piezoeléctricos

El uso de materiales piezoeléctricos como fuente de energía renovable y especialmente para generar energía eléctrica presenta muchas ventajas, pero también ciertos inconvenientes.

Lo bueno de estos materiales es que suelen ser pequeños y ligeros lo que facilita mucho su instalación, adaptabilidad a otros mecanismos y uso posterior. Pueden funcionar bajo condiciones ambientales muy distintas, a diferentes temperaturas, presiones, etc. Tienen una baja huella de carbono, lo que los convierte en una muy buena alternativa a los combustibles fósiles.

El mayor inconveniente es la baja cantidad de electricidad producida, así que a menos que grandes instalaciones sean puestas en marcha, simplemente no habría la suficiente energía para alimentar los dispositivos. Otro inconveniente es que mientras no se aplique ninguna tensión mecánica ninguna carga eléctrica será producida [8].

Análisis teórico por unidad de Piezoelectric Harvesting.

Para evaluar la propuesta de implementar en las carreteras unidades de piezoelectric harvesting para recolectar energía de vibración inducidas en el tráfico, es necesario es necesario investigar las características eléctricas y las propiedades de la recolección de energía de los piezoelectric harvesting bajo excitación extrema [6]. De acuerdo con las Normas IEEE sobre piezoelectricidad, bajo la presión de excitación variable en el tiempo, dada por deformación S, tensión T, campo eléctrico E y el desplazamiento eléctrico D, las relaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos se define por:

$$\begin{bmatrix} T_3 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_3^E & -e_{33} \\ e_{33} & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_3 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

- a. e_{33} : Coeficiente piezoeléctrico
- b. C_3^E : Constante de rigidez elástica bajo un campo eléctrico estacionario
- c. ϵ_{33}^S : Constante dieléctrica bajo tensión constante

Para la piezoelectric stack los parámetros de la ecuación 1 se puede calcular como:

$$S_3 = \frac{x_2}{h} \quad E_3 = \frac{V_p}{t} \quad T_3 = \frac{F_p}{A} \quad D_3 = \frac{Q}{nA} \quad (2)$$

Donde:

- a. h: Altura de la stack
- b. A: Área de la sección transversal de la stack
- c. t: Espesor de una oblea piezoeléctrica simple
- d. F_p : Fuerza variable en el tiempo aplicado sobre la stack
- e. x_2 : Deformación
- f. Q: Carga eléctrica generada por la stack
- g. V_p : Voltaje de salida de la stack
- h. n: Número de obleas piezoeléctricas utilizadas

Efecto de vibración en el pavimento

La deformación producida por el contacto entre el neumático del vehículo y el pavimento se describe en la Figura 1

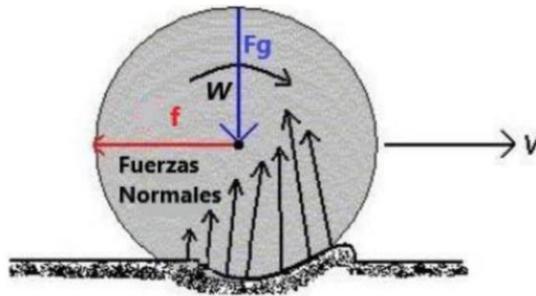


Figura 1. Diagrama de fuerzas del neumático

Cuando el automovil pasa sobre el pavimento, este genera una presión sobre el asfalto, esta presión es capaz de producir electricidad al pasar por un generador. Este generador es el material piezoeléctrico que transforma la energía mecánica en energía eléctrica [6].

$$E_{mec} = E_p + E_c \quad (3)$$

FUNDAMENTOS Y MATEMÁTICAS DE LA PIEZOELECTRICIDAD

La conversión de energía depende del coeficiente de acoplamiento piezoeléctrico (k_{ij}) y de la capacitancia del material piezoeléctrico (C_p). La polarización eléctrica es proporcional a la tensión aplicada. Los materiales piezoeléctricos tienen dos modos de operación, incluidos 33 modos y 31 modos (Ver tabla 3). Los generadores piezoeléctricos suelen funcionar en modo 33 o en modo 31. La mayoría de los recolectores de energía piezoeléctrica utilizan el modo 33, debido al mayor coeficiente de acoplamiento en el modo 33 [12]. Como muestra la Figura 2, los parámetros piezoeléctricos son los siguientes:

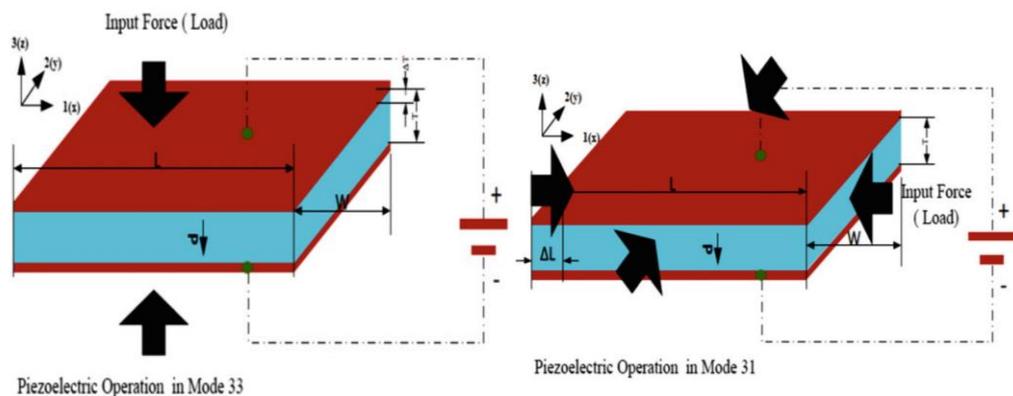


Figura 2. parámetros piezoeléctricos

Tabla 3. Formulaciones de modos de operación piezoeléctrica

	<i>Mode 33</i>	<i>Mode 31</i>
Voltage	$V = \frac{g_{33} \times F \times T}{W \times L}$	$V = \frac{g_{31} \times F}{w}$
Charge	$q = d_{33} \times F$	$q = \frac{d_{31} \times F \times L}{T}$
Displacement	$\Delta T = d_{33} \times V$	$\Delta L = \frac{d_{31} \times L \times V}{T}$ $\Delta W = \frac{d_{31} \times W \times V}{T}$

Energía de Deformación

La energía de deformación se divide en una contribución de energía elástica y otra eléctrica, como sigue:

$$\delta W_{int} = \delta W_{int}^d + \delta W_{int}^e = \int_V \delta(\epsilon_R^T \sigma') dV + \int_V \delta(\bar{E}^T \mathbf{D}) dV \quad (4)$$

Despreciando las tensiones iniciales y usando la Ec. (1), se obtiene:

$$\begin{aligned} \delta W_{int}^d &= \int_L \delta \epsilon_R^T \tilde{C} \epsilon_G dx + \int_V \bar{E}^T \mathbf{e}^T \delta \epsilon_R dV \\ &= \int_L \delta \epsilon_G^T (S_2 C' S_T) \epsilon_G dx + \int_V \bar{E}^T \mathbf{e}^T \delta \epsilon_R dV \end{aligned} \quad (5)$$

$$\delta W_{int}^e = \int_V \delta \bar{E}^T \mathbf{e}^T \epsilon_R dV - \int_V \delta \bar{E}^T \epsilon^s \bar{E} dV \quad (6)$$

Es importante destacar que la primera integral en la Ec. (4) se debe a la deformación elástica de un cuerpo y la segunda integral proviene de la energía electrostática, que representa al trabajo realizado por la carga mientras se mueve de un cátodo a un ánodo [18].

Coeficiente de poisson:

El coeficiente de poisson se presenta cuando un material o cuerpo se somete a una deformación, la cual se genera en forma longitudinal y transversal a la vez, debido a que toda tracción longitudinal con alargamiento implica una contracción transversal como se puede ver en la figura 3. La relación entre las deformaciones transversales y

longitudinales es constante, siempre y cuando el material se encuentre en el rango elástico de esfuerzos

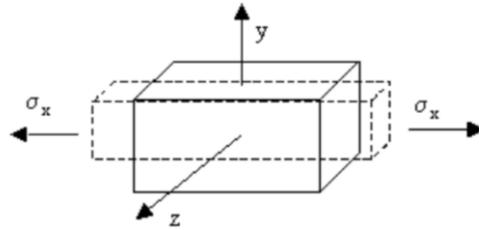


Figura 3. Las direcciones de la deformación de un material aplicando una fuerza

La ecuación 7 determina el coeficiente de Poisson de un cuerpo cuando se aplica una fuerza sobre una superficie [13].

$$\mu = - \frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (7)$$

Donde:

μ : Relación de coeficiente de Poisson

$\varepsilon_{transversal}$: Deformación del material en la dirección donde se aplica la fuerza

$\varepsilon_{longitudinal}$: Deformación del cuerpo en los laterales donde se aplica la fuerza

Entonces para la figura anterior la ecuación queda de la siguiente manera,

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \right| \quad (8)$$

Coefficiente de acoplamiento electromecánico

El coeficiente de acoplamiento electromecánico, k , es un factor que nos permite conocer la fracción de energía eléctrica convertida a energía mecánica y viceversa. En concreto, el cuadrado del coeficiente de acoplamiento es igual a la relación entre la salida de energía mecánica (energía convertida) y la entrada de energía eléctrica (energía suministrada) como se puede ver en la ecuación 9.

$$k^2 = \frac{\text{Energía convertida}}{\text{Energía suministrada}} \quad (9)$$

Este coeficiente se define también con subíndices, el primero indica la dirección en la que están colocados los electrodos y el segundo la dirección en la que se aplica o se desarrolla la energía mecánica. Idealmente, se desea disponer de un material con un alto coeficiente de acoplamiento electromecánico ya que esto significa que se logra una conversión más eficiente de la energía.

Análisis de energía

Para estimar la energía total generada, la causa principal del análisis de pérdida de energía es vital, que se debe a los componentes suplementarios del sistema, como el convertidor elevador de CC, el rectificador y el inversor. Sin embargo, la energía producida tiene ciertas limitaciones ya que no capta toda la energía cinética de los vehículos y la transforma en energía eléctrica útil. Esto se debe a la variación en la frecuencia y velocidad de desplazamiento del vehículo que comúnmente se define como parámetros característicos de entrada. Por lo tanto, la siguiente fórmula proporciona una estimación de la energía cinética utilizada por los vehículos a diferentes velocidades de viaje, es decir, el impacto de la carga en la superficie del badén, que se conoce comúnmente como intensidad de carga dada por

$$\text{Intensidad de carga} = \frac{Mv(Cfr)(Nc)}{Ac(Vv)} \quad (10)$$

Mv=masa del vehículo

Cfr=coeficiente de fricción de rodadura

Nc=neumáticos de contacto

Ac= área de contacto

Vv= Velocidad de viaje

SENSOR PIEZOELÉCTRICO

El sensor piezoeléctrico lo podemos ver en la figura 4, este sensor puede ser utilizado con un principio de funcionamiento directo (que permite transformar la deformación del material piezoeléctrico en cargas o tensiones) o indirecto. Se consideró efecto directo, por lo que el paso de una carga de tráfico podría llegar a producir tensión eléctrica [14].

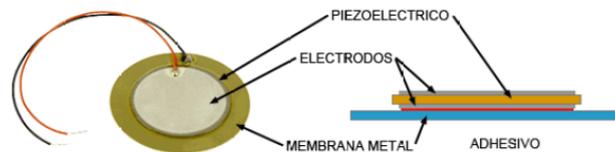


Figura 4. Sensor piezoeléctrico

TIPOS DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Se pueden usar varios materiales piezoeléctricos en la generación de energía. La Tabla 4 presenta la potencia máxima generada por materiales piezoeléctricos: fluoruro de polivinilideno (PVDF), cerámica piezoeléctrica, fibra piezoeléctrica, entre otros [3].

Tabla 4. Pico de potencia generado por materiales piezoeléctricos

Piezoelectric Material	Peak Power (mW)	Volume
PVDF	0.61	72 × 16 × 0.41 mm
Piezoelectric ceramic	52	1.5 cm ³
Piezoelectric fiber	120	2.2 cm ³
PMN-PZT single crystal	0.015	20 × 5 × 0.5 mm
PMN-PT single crystal	3.7	25 × 5 × 1 mm

APLICACIONES DE LOS PIEZOELÉCTRICOS

Los materiales piezoeléctricos hacen la conversión de la energía ambiental disponible a electricidad posible donde la vibración y la fuerza de presión estén disponibles. Las aplicaciones más básicas de esta tecnología se encuentran en los mecheros para cigarrillos o de cocina, donde se ejerce una presión sobre un cristal y éste desprende una pequeña carga de energía en forma de chispa para encender el gas. Otra aplicación muy común es en los relojes de cuarzo, para eliminar la necesidad de baterías.

En aplicaciones para “Energy Harvest” se encuentran mayormente como generadores para la autonomía de pequeños dispositivos que no requieren mucha energía, como diferentes tipos de sensores; de esa manera se elimina la necesidad de baterías. Últimamente, el uso de materiales piezoeléctricos en suelos, se experimentó en la estación de trenes en Tokio Japón y pistas de baile (Ver figura 5). Además, los materiales piezoeléctricos se han utilizado en suelas de zapatos. Se ha informado que la energía obtenida de los movimientos humanos se puede utilizar para funcionar aparatos electrónicos [19]



Figura 5. Pista de baile con baldosa piezoeléctrica

Circuito equivalente de los materiales Piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos expuestos a campos de tipo variable tendrán una respuesta de armonía con dicho campo, con base en esa hipótesis se tiene que, si se conectan dos placas metálicas a un generador de señales de tipo seno, el material piezoeléctrico deberá responder con un movimiento oscilatorio, dónde intentará igualar la variación de voltaje de la señal como se puede observar en la figura 6 que hace alusión al esquema de un material piezoeléctrico, en este caso un cristal, y su equivalencia en circuito.

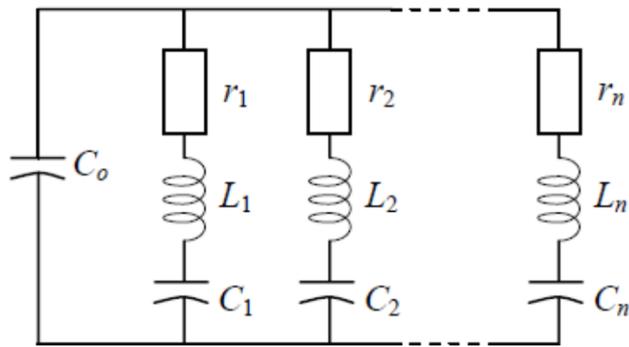


Figura 6. Equivalencia de un circuito al material piezoeléctrico

Dado lo anterior se puede definir que el comportamiento de los materiales piezoeléctricos se asemeja al comportamiento de un circuito RLC (circuito compuesto por una bobina, un condensador y una resistencia en conexión serie a la fuente), en este circuito se anula el efecto que pueda tener la bobina y el condensador sobre la corriente cuando se trabaja con la frecuencia de resonancia, eso implica que el factor de calidad el cuál se denota con la letra Q debe ser muy alto [20].

PARTES Y FUNCIONAMIENTO DE BALDOSA PIEZOELÉCTRICA

La baldosa piezoeléctrica se compone principalmente de tres partes (Ver figura 7):

- Nivel superior: Es la parte que tiene contacto directo con la persona, que puede ser de diversos materiales tales como cerámica, hormigón, madera, polímeros, entre otros.
- Nivel intermedio: Es donde se alojan los sensores piezoeléctricos encargados de generar la energía. Cada baldosa lleva conectado en si varios de estos sensores para generar más energía.
- Nivel inferior: En este nivel se realiza la conversión de energía mecánica en energía eléctrica mediante conexiones eléctricas. La energía que se produce es corriente alterna, la cual puede ser transformada en corriente continua en la misma baldosa o en un circuito eléctrico más completo apartado de esta [21].

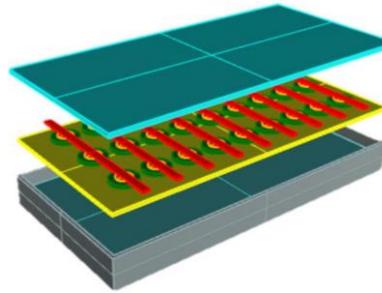


Figura 7. Partes de una baldosa piezoeléctrica

DIAGRAMA DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA

Este sistema cuenta con 4 bloques como se puede ver en la figura 8. El primer bloque es el transductor piezoeléctrico, también conocido como sensor piezoeléctrico. La conversión de energía tendrá lugar cuando la tensión se aplique a la superficie del disco piezoeléctrico. El segundo bloque es el circuito convertidor CA-CD. La función de este bloque es convertir la fuente de CA en una fuente de CD. El tercer bloque es un circuito convertidor de CD-CD, principalmente para hacer coincidir el voltaje de la fuente con el nivel de carga de la batería. El cuarto bloque es el almacenamiento que suele utilizar una batería para almacenar la carga de la fuente. Por lo tanto, la carga almacenada en la batería podría usarse para energizar y alimentar la aplicación [22]

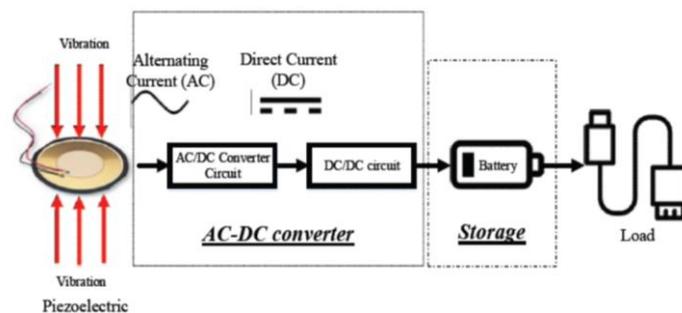


Figura 8. Diagrama de bloque del sistema piezoeléctrico

CANTIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE LOS PIEZOELÉCTRICOS

Se debe tomar en cuenta que el voltaje que genera el piezoeléctrico depende directamente de la fuerza aplicada en él. Por lo tanto, cuando un vehículo pasa por encima, no se puede asegurar que la fuerza llegue a todos los piezoeléctricos en el mismo instante de tiempo. Al ser entonces una conexión en paralelo, en cada instante de tiempo solamente generará

carga el piezoeléctrico que tenga la mayor presión instantánea. Bajo la anterior premisa, se hace innecesario poner una gran cantidad de piezoeléctricos, ya que esto sería subutilizarlos. Solamente un piezoeléctrico genera carga en cada instante de tiempo, mientras que los otros no deberían generar carga alguna. Sería bueno por ejemplo poner muchos piezoeléctricos, pero solo en el caso de que se pudiera asegurar que la fuerza llega exactamente al mismo tiempo a todos los elementos, algo que no se puede asegurar en el presente trabajo.

PROCESO DEL SISTEMA

Se selecciona un puente rectificador de diodos, (Ver figura 9) para este proyecto ya que los sensores piezoeléctricos son capaces de producir voltajes positivos y negativos, de esta manera el puente rectificador de diodos convierte el voltaje negativo en voltajes positivos, con este dispositivo, el circuito de los piezoeléctricos genera una mayor cantidad de voltaje. En la figura 9 se muestra el circuito rectificador de onda [23]

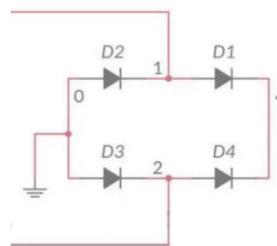


Figura 9. Rectificador tipo puente

El siguiente paso una vez rectificada la onda es el filtrado de la misma, lo que se consigue con un condensador, y finalmente en función de la carga que se alimentará, es muy normal colocar un circuito regulador de tensión, para evitar sobrecargas en la carga y acaba en este caso en una batería para el almacenamiento de la energía [2], ver en la figura 10

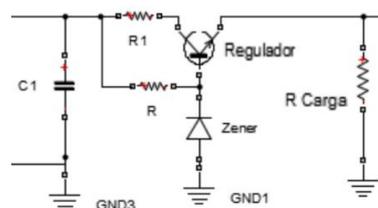


Figura 10. Etapa de filtrado, regulación y almacenamiento

DIAGRAMA DE FLUJO

Primero identificamos los lugares con mayor flujo de vehículos, para ello se elaboró el perfil vial que sirve como guía para identificar cuantos carros y que tipos de carro circulan por un determinado lugar, una vez realizado este estudio, pasamos a agrupar los vehículos según su modelo para que podemos identificar de forma más fácil la cantidad de energía aproximada que generaría cada uno de ellos cuando circule, para que después se identifique el potencial energético en ese punto, luego se realizan las pruebas con el prototipo con lo cual pasamos a la cuantificación de la energía, luego realizamos un análisis del cálculo teórico y práctico con la finalidad de verificar la propuesta y finalmente se implementa el modelo final de la baldosa que se colocará en la carretera (Ver figura 11).

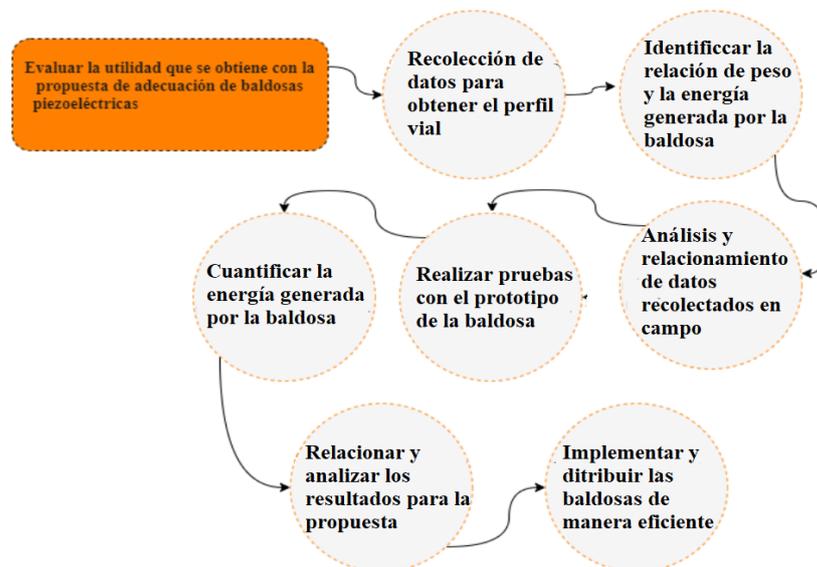


Figura 11. Diagrama de flujo para implementar el sistema piezoeléctrico

DISEÑO INICIAL DEL CIRCUITO GENERAL

En el diseño del circuito rectificador, el voltaje de entrada aproximado del piezoeléctrico se establece en 30 V; a partir de esto, se seleccionan el puente rectificador monofásico KBP202G, los valores del capacitor ($C1$, $C2$, $C3 = 0.1 \mu F$) y el regulador de voltaje positivo L7815CV para realizar el circuito de recolección de energía; el voltaje de salida es igual a 15 V. Las dos celdas son baterías de iones de litio, que funcionan a 3,7 V, con una capacidad de 2850 mAh [24], luego en la etapa de Convertidor de

voltaje está el convertidor voltaje DC-DC MT3608 que tiene como función entregar un voltaje de salida constante superior al voltaje de entrada frente a variaciones del voltaje de entrada o de carga y que soporta corrientes de salida de hasta 2A, voltaje de entrada entre 2V a 24V y voltaje de salida entre 2V a 28V. Los circuitos de recolección de energía se muestran en la figura 12

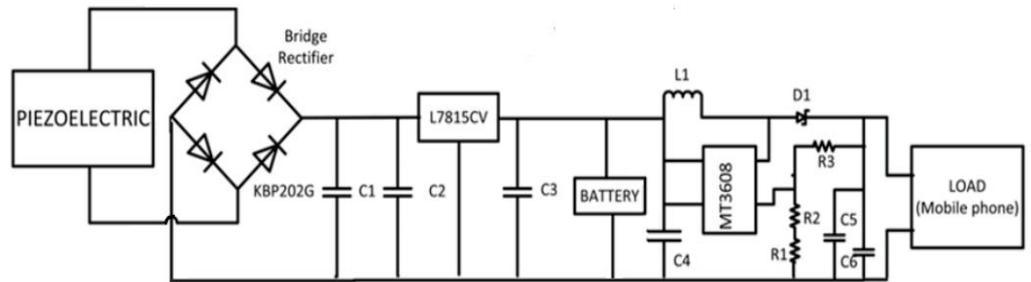


Figura 12. Diseño general del circuito eléctrico del sistema piezoeléctrico

DISEÑO MECANICO INICIAL DEL SISTEMA PARA LA COSECHA DE ENERGÍA PIEZOELECTRICA

Para el diseño mecánico del dispositivo, utilizamos SolidWorks 2022 para renderizar el mosaico del transductor de recolección, como se muestra en la Figura 13. El transductor de recolección se diseñó con unas dimensiones de 400 mm x 400 mm x 70 mm [25].

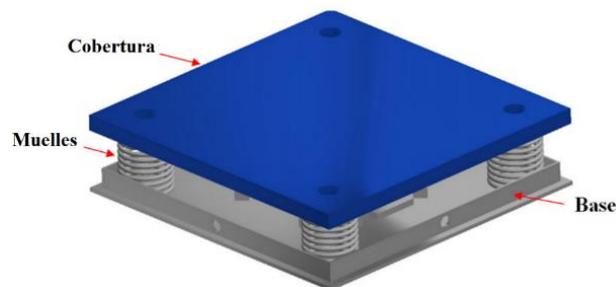


Figura 13. Diseño mecánico del sistema piezoeléctrico

La ubicación simétrica de los sensores piezoeléctricos fue diseñada para maximizar la fuerza inducida aplicada a cualquier ubicación en la superficie de la loseta. Se montaron cuatro resortes con una altura de 60 mm, un diámetro de 56 mm y una constante de 7.82 kgf/mm en las cuatro esquinas del marco.

MODELADO DEL CIRCUITO DE CARGA

El último paso es adecuar la energía que se obtiene a través de los materiales piezoeléctricos en forma de pulsos o corriente alterna muy variable, con cambios en la amplitud e incluso en la frecuencia, es transformarla en una corriente continua apta para su uso.

La forma de onda (Ver figura 14), dependerá de las propiedades del sistema externo, dependiendo tanto de la fuerza de aplicación, como de la frecuencia. También influirán las propiedades del PZT. A continuación, se muestran dos ejemplos de ondas diferentes, ambas con el mismo piezoeléctrico, pero con distintos sistemas de excitación.

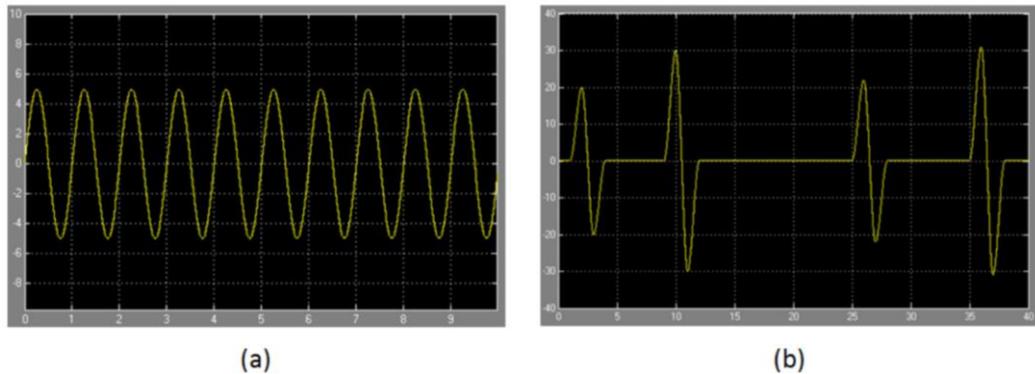


Figura 14. Señales producidas por los PZTs, (a) Señal continua, (b) Señal de pulsos

Como se puede observar en la figura (a), se trata de una señal constante, podría ser debida a una vibración, o el efecto producido por una persona al caminar a ritmo constante, lo cierto es que lo más probable es que aunque en la figura no se aprecien grandes diferencias, la amplitud de la señal no sea siempre completamente constante. En (b), tenemos un sistema discreto, en el que la señal está determinada por impulsos, cambiando tanto de amplitud como de frecuencia. Esta segunda sería parecida a la forma que se tendría si se colocase un piezoeléctrico en una carretera y pasaran distintos vehículos sobre el mismo.

La potencia promedio proyectada

Este valor se puede determinar mediante la ecuación 11, dicha fórmula se obtuvo después del proceso de un estudio matemático expresadas en el

marco teórico, en el cual T_o está definido por la separación en medio de los ejes de cada modelo de vehículos y su velocidad, el pulso longitudinal es el área de contacto de la rueda y la velocidad del automóvil y P_{peak} es a la máxima potencia generada por el automóvil encima de la baldosa.

$$P_{avg} = \frac{\tau}{T_o} P_{peak} \quad (11)$$

En este diseño el T_o , se resolvió como la separación media de los ejes para cada modelo de vehículos medida anteriormente [26].

2.3. Definición de términos básicos

Efecto piezoeléctrico: La generación del efecto piezoeléctrico se utiliza mediante la tensión mecánica en electricidad, y la electricidad en vibraciones mecánicas.

Campo Eléctrico: Es la fuerza eléctrica por unidad de carga, dirigida radialmente hacia afuera de una carga positiva y radialmente hacia el interior de una carga negativa.

Energía Mecánica: Energía que presentan los cuerpos en relación de su movimiento.

Materiales piezoeléctricos: Son materiales sin centro de simetría a nivel molecular, de hecho, es gracias a ello que estos se polaricen al deformarse o viceversa. Esto se debe a un desplazamiento de las cargas internas.

Eficiencia energética: Es la relación entre la energía que se aprovecha y la energía usada, ya sea por el uso de la forma primaria de energía o durante cualquier actividad de producción, transformación y consumo de las diferentes formas de energía

Deformación mecánica: La energía de deformación mecánica es el resultado de la deformación mecánica introducida en la piezocerámica. La deformación mecánica es el cociente de la fuerza y el área y la constante elástica

Constantes piezoeléctricas: Son fundamentales para saber que los materiales piezoeléctricos son materiales anisótropos, definiendo las

diferentes constantes en función de las direcciones de tensión mecánica y deformación mecánica para generar las fuerzas eléctricas o viceversa.

Controlador de carga: Cumple como función principal recibir la energía proveniente de los generadores y de proteger los demás equipos de variaciones de voltaje, en otras palabras, funciona como un regulador de voltaje.

Definición del entorno: Aquí se detallan las condiciones de contorno del sistema, es decir los datos del tráfico y las características de la vía. Además, se generan los modelos de los diferentes vehículos, así como su interacción con los materiales piezoeléctricos.

Frecuencia de Resonancia: Es aquella frecuencia característica de un cuerpo o sistema que alcanzó un grado máximo de oscilación.

Multímetro: Es un instrumento multifuncional que sirve para medir corriente, tensión, capacitancia, resistencia eléctrica, entre otros y se le denomina como polímetro.

Hora pico: Es el periodo en la cual se puede observar el mayor flujo de una variable.

Convertidor CA-CC: Son sistemas que convierten la corriente alterna de la señal de salida de los transductores piezoeléctricos a corriente continua después de transformado las vibraciones mecánicas en energía eléctrica para obtener una fuente de alimentación de corriente continua adecuada para sistemas electrónicos de baja potencia.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis general

HG: La recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras cargará eléctricamente equipos de bajo consumo

Hipótesis específicas

- Implementar la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras generará energía que alimente equipos de bajo consumo

- La recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras mejorará el ahorro energético al utilizarse en equipos de bajo consumo

Hipótesis nula

La recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras no cargará eléctricamente equipos de bajo consumo

3.1.1 Operacionalización de variable

a) Variables Dependiente:

Carga eléctrica de equipos

b) Variables Independientes:

Recolección de energía piezoeléctrica

Tabla 5. Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES
VARIABLES INDEPENDIENTES	Recolección de energía piezoeléctrica	Se realiza con el Transductor piezoeléctrico que puede convertir tensión mecánica en carga eléctrica	Parámetros Físicos	Constante de Tensión Piezoeléctrica
				Conductividad Eléctrica
				Cantidad de material
			Condiciones del pavimento	Distribución de las baldosas
				Flujo vehicular
				Nivel de vibración
VARIABLES DEPENDIENTES	Carga eléctrica de equipos	Se realiza con la energía producida o almacenada que se obtiene con baldosas piezoeléctricas	Generación de energía	Almacenamiento de energía eléctrica
				Potencia eléctrica
			Ahorro energético	Precio en el cobro de energía eléctrica
				Eficiencia energética

Fuente: Elaboración propia

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño de Investigación

El tipo de Investigación es cuantitativa pues en ella se toman datos de las diferentes variables físicas y estos serán evaluados para aprovechar la energía vibratoria.

El nivel de la investigación es Descriptivo-Explicativo. Descriptiva porque describe las características de los sistemas de captación de energía y se realiza una descripción detallada de todos los elementos del sistema. Es Explicativa porque se analiza las relaciones causa efecto de la energía generada respecto a las variables tomadas.

4.2. Diseño de Investigación

La presente investigación toma datos comparativos entre la recolección de energía piezoeléctrica seleccionados en una pista con alto flujo vehicular. Un diseño Experimental – Pre-Experimental.

4.3. Método de investigación

4.3.1. Elección del software simulador

El primer paso para poder proponer un modelo del generador piezoeléctrico será hacer la elección del software de simulación que se utilizará. Es importante hacer por ello un análisis para saber si el programa que se propone utilizar cumple con los requisitos necesarios para la resolución del sistema. Otro punto a tener en cuenta es que el usuario entienda el programa y demuestre un dominio suficiente tanto para trabajar con él como para poder hacer uso de sus funcionalidades.

Para el desarrollo de este trabajo se han testado dos programas de simulación, con la intención de elegir el más adecuado para el modelo la resolución de los sistemas planteados. El primero de ellos es Simulink de MathWorks, un programa de base Matlab y que se utiliza para resolver todo tipo de sistemas, mecánicos, eléctricos, señales, etc. El otro programa testado es Multisim, de National Instruments, que es un programa especializado en circuitos y electrónica.

El Simulink tiene la ventaja de tener gran versatilidad y posibilidad de combinar sistemas. Además, al ser un software muy extendido cuenta con una gran experiencia de usuarios, lo que ayuda a encontrar información en la red. Además la página web del fabricante [31] hay una gran cantidad de ejemplos de circuitos, y soporte para resolución de problemas.

4.3.2. Simulación inicial del sistema

Se escribió el script MATLAB que incorporó las propiedades del material piezoeléctrico (PZT 5H) enumeradas en la Tabla 6. Como el objetivo principal del script MATLAB es variar las especificaciones para cada ciudad/país, se toma en cuenta el peso del vehículo, la velocidad y la temperatura de la carretera.

Tabla 6. propiedades del material piezoeléctrico (PZT 5H)

Parámetro	Valor
Relación de Poisson (μ)	0.15
Módulo de Young E (Mpa)	27560
Densidad (ρ)	2323
Módulo de Winkler (K) (Mpa/m)	136
Carga distribuida del vehículo (p_0) (Mpa)	0.267
Distancia entre las cargas en movimiento ($2d_0$)	1.22
Longitud del transductor (l_p)	0.1
Ancho (b_p)	0.1
Grosor (h_p)	0.01
Constante de distensibilidad elástica, s_{11} (pm ² /N)	16.5
Constante de distensibilidad elástica, s_{12} (pm ² /N)	-5.74
Constante piezoeléctrica, d_{31} (pV/m)	-274
Permitividad, ϵ_{33} (nF/m)	30.06
Carga resistiva (k Ω)	800

La velocidad del vehículo se determinó según lo que el MTC (Ministerio de Transporte y Comunicaciones) señala según el tipo de vehículos, la cual nos dice que la velocidad promedio en las carreteras seleccionadas es de 60km/h. Por ello en la simulación se consideró para la prueba velocidades de 60, 80 y 100 km/h. Después de esto, el script se llamó dentro del modelo de Simulink como fuente "DATOS". Después de esto, se implementó el modelo Simulink (Figura 15) en base a lecturas de salida derivadas del script MATLAB.

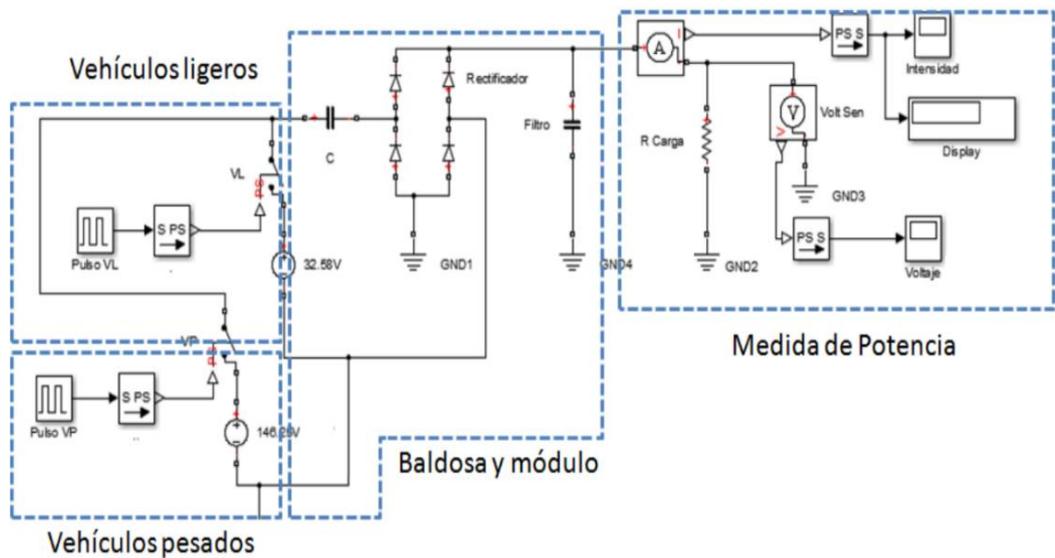


Figura 15. Simulación del sistema piezoeléctrico en Simulink

Donde C tiene el valor calculado para cuatro baldosas trabajando al tiempo. El pulso VL viene determinado por el tiempo de paso de los vehículos ligeros por el módulo, VP es equivalente a VL pero con vehículos pesados, y el valor de V depende del tipo de vehículo que pase por los PZTs.

4.3.2. Evaluación de tránsito vehicular y peatonal en la zona de mayor afluencia

Luego de realizar la recolección de datos de transitabilidad peatonal y vehicular, se determinó que una de las áreas de mayor afluencia es la Av. Elmer Faucett. Por tanto, se decidió realizar la recolección de datos en el

paso peatonal de la intersección de la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez (Cuadro rojo, Figuras 16), durante 4 semanas calendarios.

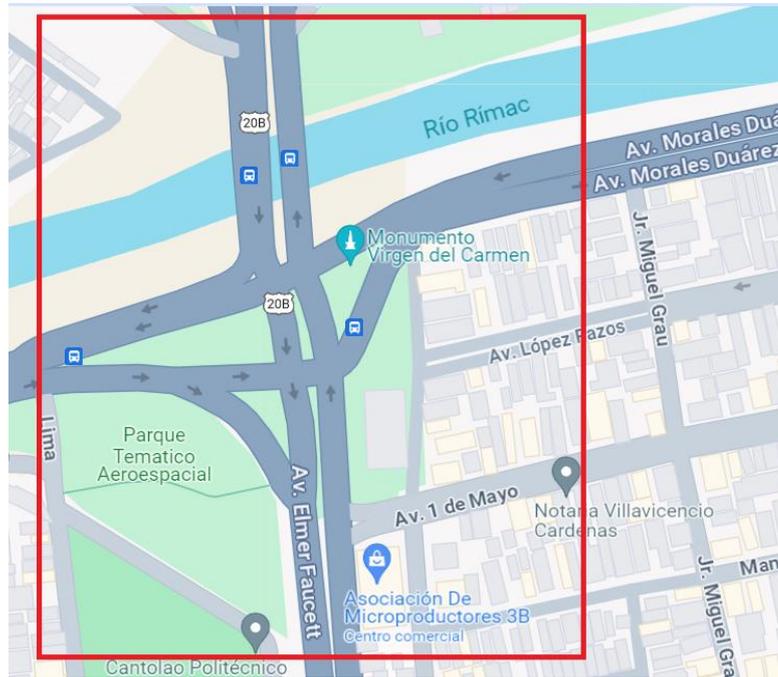


Figura 16. Intersección de la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez Durante esas 4 semanas, se cuantificó la circulación vehicular y peatonal en periodos de 1 hora, desde las 6 am hasta las 9 pm. La información se presenta en distribuciones de ocurrencia respecto a hora del día y respecto a día de semana como se muestra en la Tabla 7 durante el periodo mencionado de recolección de datos de transitabilidad vehicular.

Tabla 7. Frecuencia mensual de tránsito vehicular, correspondiente al periodo de 4 semanas

"Generación de Energía Piezoeléctrica en la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez para cargar equipos de bajo Consumo "						
Responsable: Santiago Rubiños	Fecha: 06 de noviembre al 03 de diciembre		Universidad: Universidad Nacional del Callao			
Ubicación: Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez						
	Bus	Camión	Carro	Moto	Combi	Total
Semana 1	5342	3427	6108	3592	4782	23251
Semana 2	5216	3468	6119	3457	4796	23056
Semana 3	5381	3321	6146	3389	4872	23109

Semana 4	5291	3421	6075	3451	4814	23052
----------	------	------	------	------	------	-------

4.3.3. Implementación final del circuito

Para suministrar energía al sistema se utilizó la batería con capacidad de 1500 mAh y un circuito de carga TP4056 para conectar a la batería de litio que se carga a través de un conector micro USB universal, este módulo estará conectado al pin positivo y negativo de la batería a través de sus pines B+ y B- respectivamente. Se implementaron sensores piezoeléctricos, para que cuando se pise la baldosa la energía generada pueda acumularse en la batería y esta se pueda utilizar para cargar equipos de bajo consumo. Para aprovechar esta fuente de energía, la corriente generada por los sensores piezoeléctricos se rectificó a través de un módulo puente de diodos rectificadores de onda completa llamado 2W10 que carga el capacitor hasta un voltaje predefinido y un Regulador de voltaje 7805 para mantener constante la salida de voltaje que finalmente será conectado a la batería. El dispositivo portátil emisor contiene un interruptor para encender y apagar el dispositivo. Todo esto se puede ver en la Figura 17.

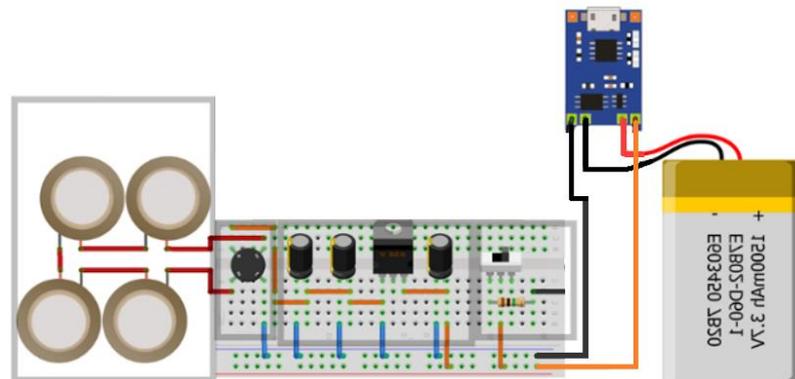


Figura 17. Circuito electrónico de la baldosa piezoeléctrica

4.3.3. Implementación final del sistema mecánico

En el modelado inicial se asumió que el uso de resortes aumentaba la energía recolectada; cuando el primer impulso oscilante se alejaba, el resorte ejercería la fuerza de reacción de regreso a la placa piezoeléctrica como si estuviera continuamente excitada. Cuando la rigidez general del

resorte disminuyera, afectaría las frecuencias naturales del sistema: el material daría como resultado períodos de oscilación más prolongados, lo que contribuiría a una cantidad más significativa de energía recolectada. Basándonos en experimentos preliminares, determinamos que esta suposición era correcta. Por lo tanto, se creó un modelo de piso en miniatura; En este modelo, la fuerza de excitación de cada dispositivo piezoeléctrico se hizo coincidir en fase a través de los módulos piezoeléctricos y una placa de aluminio para entregar una señal eléctrica de interferencia constructiva como se puede ver en la Figura 18



Figura 18. Sistema mecánico externo de la baldosa piezoeléctrica

Una vez obtenida la baldosa se colocarán los 36 discos piezoeléctricos de manera uniforme y en paralelo, en la cual todos queden simétricamente iguales y de esta forma se estaría evitando problemas a la hora de hacer la soldadura con el cableado de cobre.

Ya colocado todos los discos piezoeléctricos se pasó a soldar estos con el cable de cobre y para ello se necesitó al caudín y el estaño, luego de haber soldado uno por uno cada disco piezoeléctrico en paralelo para poder obtener más corriente eléctrica y así mismo conservando la tensión en el rango el cual se va a trabajar, se pasó a comprobar si estaba correctamente unido cada uno de ellos, con la ayuda de un multímetro.

Dejando como paso final en la elaboración de la baldosa piezoeléctrica, la colocación de la frisa esponjosa de caucho debajo de los discos

piezoeléctricos como se puede ver en la figura 19, debido a su capacidad de elasticidad al momento de ejercer una presión sobre este y siendo un buen aislante eléctrico a la hora de estar en contacto con las conexiones eléctricas



Figura 19. Sistema interno de la baldosa piezoeléctrica

Distribución de las baldosas piezoeléctricas

Las baldosas se instalan en el carril principal cerca del carril de emergencia y a lo largo del recorrido de las ruedas de los vehículos. Para reducir los daños causados por la construcción de la carretera, el espacio es de 2.5 m entre dos baldosas piezoeléctricas a lo largo de la carretera y el espacio horizontal es de 1.875 m.

4.4. Población y muestra

La población está determinada por una pista ubicada en el distrito de Callao

Ubicación Espacio Temporal: Ciudad del Callao

Determinación de la Muestra: 1 pista del distrito de Callao en la región Callao

Método de muestreo no probabilístico.

4.5. Lugar de estudio y periodo desarrollado.

Esta investigación se encuentra dirigida por locación en el distrito de Callao de la Región Constitucional de Callao – Perú y será desarrollado en el periodo de un año

4.6. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

La técnica de recolección de datos que se utilizó fue una base de datos con el perfil vial de las diferentes avenidas del Callao, los documentos del MTC y la base de datos SCOPUS para la obtención de fórmulas de cálculo necesarias para la simulación del sistema piezoeléctrico y los datos con los que se comparará este estudio

4.7. Análisis y procesamiento de datos.

Se realizó la simulación en el software Matlab utilizando la herramienta Simulink para cuantificar la producción de energía y realizar una simulación de la influencia que tiene el peso, la velocidad y el flujo vehicular en la cantidad de energía producida. Para el análisis y procesamiento de los datos se utiliza el SPSS (Tablas, Figuras, Gráficos).

V. RESULTADOS

5.1 Resultados inferenciales.

Simulación de producción de energía considerando la velocidad y cantidad de vehículos

Al ejecutar el script se percibe la información requerida que estima la energía total generada para varios tipos de tráfico que viajan a velocidades de 40, 60, 80 Km/h como se puede apreciar en la figura 20 donde se obtuvo que la energía mínima producida es de 5.02 kWh tomando en cuenta que el tráfico promedio es de 100 vehículos que viajan a una velocidad de 40 Km/h y la mayor producción de energía es de 26.18 kWh con un tráfico promedio de 400 vehículos a una velocidad de 80Km/h. La cantidad de energía puede cambiar con el cambio de vehículos que transitan y velocidad

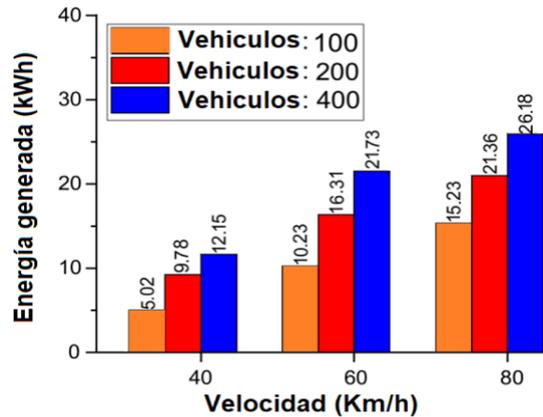


Figura 20. Generación de energía mediante el movimiento de vehículos a diferentes velocidades y tráfico

Simulación de producción de energía considerando el peso de los vehículos

Se realizó una combinación para aplicar en el prototipo en campo mediante un análisis comparativo. En esta etapa, se decidió el escenario de aplicación en la vida real de acuerdo con la simulación Multifísica. El tráfico considerado fue de 100 vehículos por hora de los cuales se consideró vehículos pesados entre los cuales está el camión con un peso de 18500 Kg y el bus con un peso de 11000 kg y los vehículos ligeros entre los cuales se menciona el carro con 1500 kg, la combi con 3500 Kg y la moto con 150 Kg. Para realizar la máxima simulación se estableció que al menos una rueda de todos los vehículos pasara por cada uno de los prototipos instalados en la vía y que todos los vehículos circulaban a la velocidad impuesta de 60 km/h. La Tabla 8 presenta la potencia obtenida para la situación simulada en esta etapa.

Tabla 8. Energía obtenida mediante el movimiento de vehículos de diferentes pesos

Vehículos pesados		Vehículos ligeros			Total de vehículos	Velocidad promedio	Total de energía generada (kWh)
Bus	Camión	Carro	Moto	Combi			
11000 kg	185000 kg	1500 kg	150 kg	3500 Kg	100	60 Km/h	16.86
28	11	26	18	17	100	60Km/h	19.37
41	13	15	10	21	100	60 Km/h	22.56
50	20	2	6	22	100	60 Km/h	15.21
18	8	35	22	17	100	60 Km/h	14.02
12	4	40	26	18	100	60 Km/h	

Resultado de la implementación de las baldosas piezoeléctricas

Para poder realizar el cálculo de generación de energía con el paso de los

vehículos en Bellavista se realizó la Tabla 9 en donde describe el tipo de vehículo, la circulación en una hora y el total de la energía generada.

En la tabla 9 y la figura 21 podemos apreciar los valores obtenidos durante la primera semana de pruebas con el equipo implementado. En la tabla se colocó el promedio de la cantidad de vehículos que transitaron durante la primera semana tomando en cuenta cada hora en el horario de 6 de la mañana hasta las 9 de la noche y se tomó en cuenta el tipo de vehículo, todo esto con la finalidad de poder identificar las variaciones que se presentan en la generación de energía durante el día en la carretera.

Tabla 9. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 1

Vehículos pesados		Vehículos ligeros			Total de vehículos	Hora de evaluación	Total de energía generada (kWh)
Bus (Prom)	Camión (Prom)	Carro (Prom)	Moto (Prom)	Combi (Prom)			
61	48	66	54	45	274	6:00-7:00	24.31
94	42	117	69	89	411	7:00-8:00	33.18
55	51	57	33	45	241	8:00-9:00	23.81
46	36	63	21	30	196	9:00-10:00	21.57
51	48	40	9	27	175	10:00-11:00	18.72
42	31	39	19	33	164	11:00-12:00	18.35
28	24	33	12	19	116	12:00-13:00	15.64
25	12	27	15	31	110	13:00-14:00	14.94
34	22	36	12	42	146	14:00-15:00	15.08
39	19	45	18	31	152	15:00-16:00	15.02
27	23	51	30	38	169	16:00-17:00	16.53
74	46	94	67	64	345	17:00-18:00	29.52
66	37	83	72	76	334	18:00-19:00	27.83
61	32	62	39	63	257	19:00-20:00	27.59
47	27	54	36	46	210	20:00-21:00	24.84

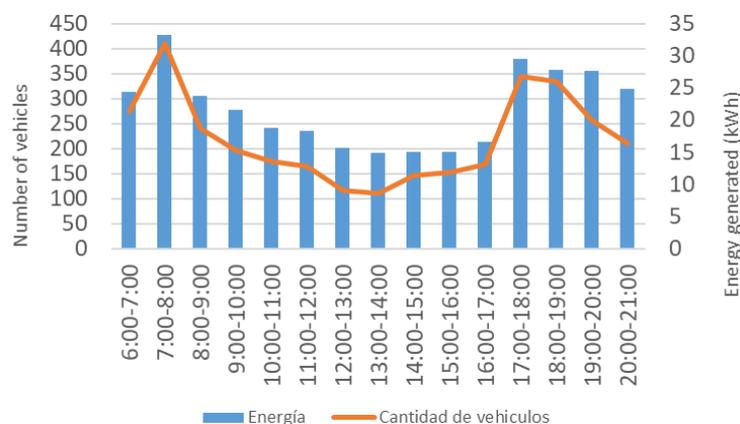


Figura 21. Número de vehículos y energía producida durante la semana 1

En la Tabla 10 y la figura 22 se registra la afluencia de vehículos en la carretera y la cantidad de energía eléctrica producida durante la segunda semana tomando en cuenta cada hora en el horario de 6 de la mañana hasta las 9 de la noche.

Tabla 10. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 2

Vehículos pesados		Vehículos ligeros			Total de vehículos	Hora de evaluación	Total de energía generada (kWh)
Bus (Prom)	Camión (Prom)	Carro (Prom)	Moto (Prom)	Combi (Prom)			
63	44	66	42	47	262	6:00-7:00	23.92
97	43	119	61	97	417	7:00-8:00	32.09
51	50	66	29	50	246	8:00-9:00	23.52
41	43	61	12	22	179	9:00-10:00	22.17
45	38	50	13	33	179	10:00-11:00	22.32
44	40	32	20	38	174	11:00-12:00	19.86
37	24	35	4	22	122	12:00-13:00	15.21
21	21	27	5	22	96	13:00-14:00	13.97
34	25	30	2	34	125	14:00-15:00	14.91
37	15	53	28	22	155	15:00-16:00	15.16
22	31	50	37	30	170	16:00-17:00	16.51
77	56	101	67	61	362	17:00-18:00	30.07
62	35	84	73	74	328	18:00-19:00	27.29
61	28	67	44	69	269	19:00-20:00	27.08
57	17	47	32	38	191	20:00-21:00	25.36

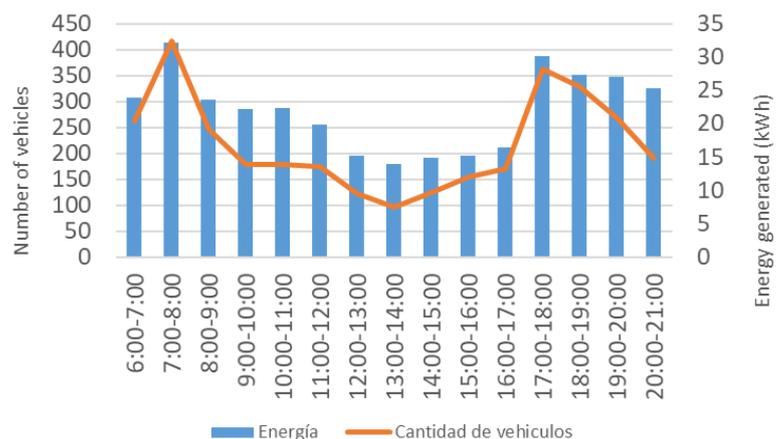


Figura 22. Número de vehículos y energía producida durante la semana 2

En la Tabla 11 y figura 23 se registra la afluencia de cada tipo de vehículo en la carretera y la cantidad de energía eléctrica producida durante la tercera

semana tomando en cuenta cada hora en el horario de 6 de la mañana hasta las 9 de la noche.

Tabla 11. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 3

Vehículos pesados		Vehículos ligeros			Total de vehículos	Hora de evaluación	Total de energía generada (kWh)
Bus (Prom)	Camión (Prom)	Carro (Prom)	Moto (Prom)	Combi (Prom)			
68	50	75	55	44	266	6:00-7:00	22.53
91	31	114	58	82	423	7:00-8:00	32.92
63	50	50	33	36	251	8:00-9:00	24.49
42	34	63	21	24	185	9:00-10:00	21.16
46	50	48	9	20	180	10:00-11:00	19.33
33	43	37	7	22	174	11:00-12:00	18.14
27	33	30	13	11	128	12:00-13:00	15.35
30	14	16	9	32	118	13:00-14:00	14.52
25	25	38	22	44	148	14:00-15:00	14.91
44	17	34	28	19	154	15:00-16:00	15.18
27	18	46	41	32	163	16:00-17:00	16.87
67	53	95	57	61	343	17:00-18:00	29.32
75	47	80	68	64	342	18:00-19:00	27.11
68	20	52	44	60	247	19:00-20:00	28.09
42	35	49	37	43	216	20:00-21:00	24.43

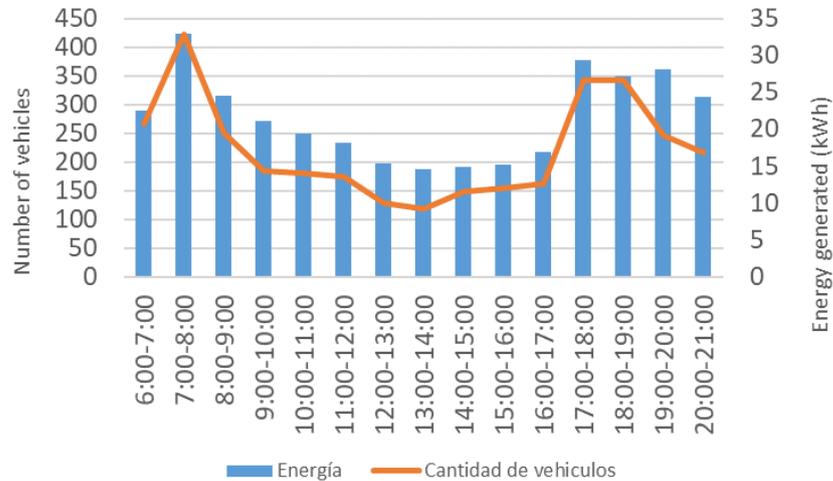


Figura 23. Número de vehículos y energía producida durante la semana 3

En la Tabla 12 y figura 24 se registra la afluencia de cada tipo de vehículo en la carretera y la cantidad de energía eléctrica producida durante la cuarta semana tomando en cuenta cada hora en el horario de 6 de la mañana hasta las 9 de la noche.

Tabla 12. Energía obtenida en las pruebas durante la semana 4

Vehículos pesados		Vehículos ligeros			Total de vehículos	Hora de evaluación	Total de energía generada (kWh)
Bus (Prom)	Camión (Prom)	Carro (Prom)	Moto (Prom)	Combi (Prom)			
78	50	57	58	45	270	6:00-7:00	22.81
90	47	108	81	86	396	7:00-8:00	32.93
56	60	66	41	60	229	8:00-9:00	24.06
38	24	48	25	19	191	9:00-10:00	21.85
40	46	37	17	39	178	10:00-11:00	18.69
30	35	30	28	46	156	11:00-12:00	17.92
36	33	25	15	28	106	12:00-13:00	15.33
24	10	29	15	44	109	13:00-14:00	15.19
22	26	24	5	50	157	14:00-15:00	15.32
49	5	47	12	42	154	15:00-16:00	14.73
34	13	65	24	30	162	16:00-17:00	16.28
81	49	99	54	77	344	17:00-18:00	29.76
81	33	72	71	90	321	18:00-19:00	27.34
73	44	62	37	65	244	19:00-20:00	27.18
51	13	67	44	49	201	20:00-21:00	25.29

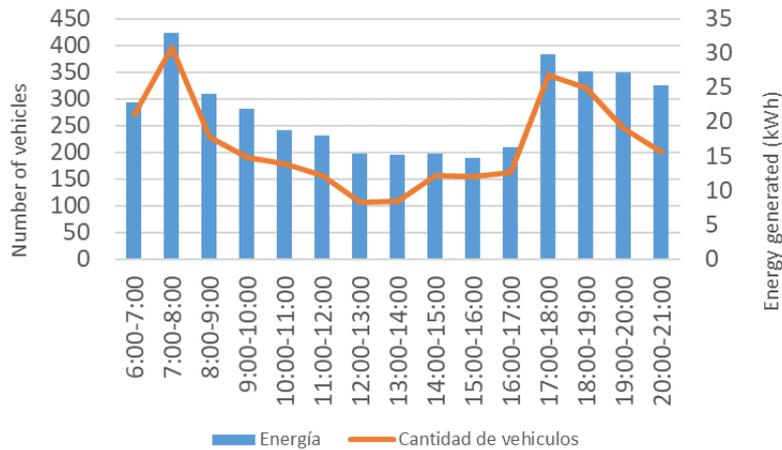


Figura 24. Número de vehículos y energía producida durante la semana 4

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

Hipótesis General

En la figura 13 podemos ver que se genera grandes cantidades de energía eléctrica debido al aprovechamiento de la vibración generada por los vehículos en diferente flujo y diferentes velocidades, esta energía va desde 18.72 kWh hasta los 215.73 kWh. Con esta energía se puede cubrir la

demanda energética necesaria para cargar equipos de bajo consumo energético.

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Respecto con la investigación de Jhan Vega [29] en el 2020, se utilizó el PZT-5A para el diseño de la baldosa piezoeléctrica la cual dio como resultado 10.75 kWh/día, lo que fue menor en comparación con la energía obtenida en la presente investigación es de 326.93 kWh/día debido a la mayor cantidad de congestión vehicular y la distribución y cantidad de los piezoeléctricos en las baldosas.

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en presente informe final de investigación, de acuerdo al Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU., donde se señala los principios éticos como norma de comportamiento conductual, así como también los autores están de acuerdo con el reglamento en donde se reconoce que la investigación es una función esencial y obligatoria en la UNAC, por ello los investigadores son responsables de los procedimientos y evaluación de su investigación.

VII. CONCLUSIONES

- Se concluye que es importante identificar el perfil vial de la zona donde se desea implementar el sistema piezoeléctrico para poder priorizar las zonas con alto flujo vehicular para la mayor producción de energía, considerando también las zonas en donde haya mayor tránsito de vehículos pesados ya que como hemos visto en la tabla 5, producen mayor cantidad de energía.
- La producción de energía eléctrica depende de la distribución de los piezoeléctricos y a de la hora del día ya que durante las mañanas en el horario de 7 a 8 A.M. hay una mayor cantidad de vehículos esto debido a que la gente

se transporta a su centro de trabajo o escolar y en las noches en el horario de 6 a 8 debido a que salen de los mismos lugares

VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el sistema piezoeléctrico se evalúe la distribución adecuada de los piezoeléctrico ya que si están muy dispersos será muy poca la energía que se podrá generar y si hay demasiados no será económicamente rentable
- Se debe tomar en cuenta que la presión del peso de los neumáticos no es igual en todos los puntos de la baldosa por ese motivo al momento de colocarlos debe de ubicárselos en un lugar estratégico y tomar en cuenta que aumentar la cantidad de piezoeléctricos no es siempre la solución, ya que puede generar un aumento en los costos

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] C. Jettanasen, P. Songsukthawan, and A. Ngaopitakkul, "Conversion of Mechanical Energy to Electrical Energy Using Piezoelectric Materials for Bicycle Lane Lighting Systems," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 14, 2022, doi: 10.3390/app12147237.
- [2] A. M. Malmcrona, "Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía," Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [3] A. Aabid *et al.*, "A systematic review of piezoelectric materials and energy harvesters for industrial applications," *Sensors*, vol. 21, no. 12, pp. 1–27, 2021, doi: 10.3390/s21124145.
- [4] D. O. Urroz, J. R. Alverto-Suazo, J. R. García-Cabrera, and C. H. Ortega-Jimenez, "Piezoelectricity: a literature review for power generation support," *MATEC Web Conf.*, vol. 293, no. 2019, p. 05004, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201929305004.
- [5] J. P. Ibarra, E. Oñate, and I. De Navarra, "Estudio de la energía obtenida mediante dispositivos piezoeléctricos incrustados en el pavimento de carreteras," Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2020.
- [6] J. Paz, "Generación de energía piezoeléctrica a partir de la vibración de los perfiles viales del pavimento en la región Lambayeque," UNPRG, 2022.
- [7] F. Meza, "ESTUDIO DE LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DEL EFECTO PIEZOELÉCTRICO PARA APLICACIONES DE BAJA POTENCIA," Universidad nacional del centro del Perú, 2022.
- [8] A. Menéndez and J. Arribalzaga, "Desarrollo de un prototipo de baldosa generadora de energía eléctrica a partir de la piezoelectricidad y almacenamiento de la energía producida," Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2022.
- [9] J. Cifuentes, "BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA ALIMENTAR SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO," ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA, 2013.
- [10] H. Cáceres, W. Capcha, and M. Ortiz, "Plan de negocio para la generación de energía eléctrica alternativa mediante el uso de baldosas generadoras de energía," ESAN, 2018.
- [11] F. Camilo, J. Pérez, and D. Juez, "Generadores Piezoeléctricos como Alternativa Energética: Evaluación de Factibilidad en la Implementación en Vías en Ciudades Intermedias," *L'Esprit I*, vol. 9, pp. 69–82, 2019.

- [12] Y. Chen and J. Wang, "Piezoelectric energy harvesting from roadway deformation under various traffic flow conditions," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1177/1045389X20930089.
- [13] A. Hoyos, "PROTOTIPO DE BALDOSA PIEZOELÉCTRICA GENERADORA DE ENERGÍA DE BAJA TENSIÓN," CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA, 2018.
- [14] JESSICA TATIANA BERNAL HERNANDEZ ANDRÉS FELIPE CASTILLO LOZANO, "ESTUDIO DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ECOBALDOSAS EN LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA", UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA, BOGOTA, D.C, 2020.
- [15] S. Cafiso, M. Cuomo, A. Di Graziano, and C. Vecchio, "Experimental analysis for piezoelectric transducers applications into roads pavements," *Adv. Mater. Res.*, vol. 684, no. April, pp. 253–257, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.684.253.
- [16] H. A. L. Miguel, "Diseño de un Sistema Generador Piezoeléctrico para reducir los costos por la Alimentación Eléctrica de los Equipos Biomédicos de Emergencia en el Hospital Santa Rosa-Lima 2021", Universidad tecnológica del Perú, Lima-Perú, 2021.
- [17] L. Walubita, D. Sohoulane Djebou, A. Faruk, S. Lee, S. Dessouky, y X. Hu, "Prospective of societal and environmental benefits of piezoelectric technology in road energy harvesting", *Sustainability*, vol. 10, núm. 2, p. 383, 2018.
- [18] J. M. Ramírez, "DESARROLLO DE DISPOSITIVOS RECOLECTORES DE ENERGÍA DE FUENTES VIBRATORIAS", UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR, Bahía Blanca, Argentina, 2021.
- [19] J. A. S. Uribe, "Visión de la aplicación de los sistemas piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica a partir del viento en edificios", Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2015.
- [20] ANDRES FELIPE JARAMILLO MAYKER GUILLERMO LÓPEZ KELLY JOHANA MUÑOZ, "DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE BALDOSAS INTELIGENTES DE ALTO TRÁFICO PARA IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO TRANSMILENIO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ", UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA, BOGOTÁ D.C., 2018.
- [21] E. Ojeda, "Diseño de instalación de baldosas piezoeléctricas para iluminar multicancha en la sede viña del mar," UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, 2019.

- [22] N. Ahmad Kamil Zainal Abidin *et al.*, “The simulation analysis of piezoelectric transducer with multi-array configuration,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1432, no. 1, pp. 0–10, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012042.
- [23] J. Burbano, “Implementación de un prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de una baldosa con elementos piezoeléctricos,” UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA, 2021.
- [24] C. Jettanasen, P. Songsukthawan, and A. Ngaopitakkul, “Development of micro-mobility based on piezoelectric energy harvesting for smart city applications,” *Sustain.*, vol. 12, no. 7, 2020, doi: 10.3390/su12072933.
- [25] T. H. Pham, T. D. Bui, and T. T. Dao, “A High-Reliability Piezoelectric Tile Transducer for Converting Bridge Vibration to Electrical Energy for Smart Transportation,” *Micromachines*, vol. 14, no. 5, 2023, doi: 10.3390/mi14051058.
- [26] P. C. J. Alexis, “Generación de energía piezoeléctrica a partir de la vibración de los perfiles viales del pavimento en la región Lambayeque”, UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”, 2022.
- [27] C. A. Bernal Torres, *Metodología de la investigación*, TERCERA ED. 2010.
- [28] Wileidys Artigas and Miguel Robles, “Metodología de la investigación:Una discusión necesaria en Universidades Zulianas,” *Rev. Digit. Univ.*, vol. 11, no. 11, pp. 1–17, 2010

X. ANEXOS

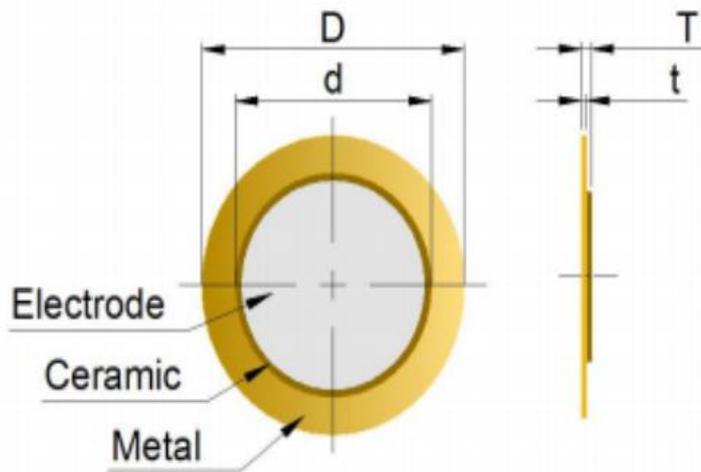
10.1

Matriz de consistencia

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	TECNICAS E INSTRUMENTACION	METODOLOGIA
<p>La energía eléctrica es una necesidad básica para la humanidad y para su desarrollo. Su demanda ha ido en aumento en los últimos años debido al crecimiento de la población y de los avances tecnológicos que requieren una gran cantidad de energía. Su producción depende principalmente de fuentes de energía no renovables, los combustibles fósiles entre los cuales podemos destacar el petróleo, el gas natural y el carbón [8]. Aproximadamente un tercio de esta energía se destina a la producción de electricidad lo que genera contaminación ambiental. El 40% de la electricidad proviene del carbón, mientras que el petróleo y la energía nuclear sólo cubren entre un 12% y 15% cada una. En términos de energía consumida, la electricidad representa el 12% del total y su destino es, por igual, los sectores industrial y residencial [9]. Además del impacto ambiental, los precios de la tarifa eléctrica en el Perú siguen elevándose cada año. Los gastos incurridos por energía son muy importantes para que desarrollen las actividades cotidianas y laborales, haciendo que este sea un gasto fijo sujeto al incremento de la tarifa que establezcan las compañías</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Aplicar la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras para cargar eléctricamente equipos de bajo consumo, Callao 2022.</p>	<p>Hipótesis General:</p> <p>H.G. La recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras cargará eléctricamente equipos de bajo consumo</p>	<p>Variable independiente</p> <p>Recolección de energía piezoeléctrica</p> <p>Dimensiones e Indicadores:</p> <p>D1: Parámetros físicos</p> <p>I1: Constante de Tensión Piezoeléctrica</p> <p>I2: Conductividad Eléctrica</p> <p>I3: Cantidad de material</p> <p>D2: Condiciones del pavimento</p> <p>I1: Distribución de las baldosas</p> <p>I2: Flujo vehicular</p> <p>I3: Nivel de vibración</p>	<p>Técnicas:</p> <p>La técnica de recolección de datos que se utilizará será la observación y documental.</p> <p>Instrumento:</p> <p>Se utilizará como herramienta el Matlab para la simulación y el SPSS para análisis estadístico.</p>	<p>Tipo y Diseño de la Investigación:</p> <p>Para el presente trabajo de investigación:</p> <p>Tipo de Investigación:</p> <p>Aplicada</p> <p>Diseño de la Investigación:</p> <p>Cuasi-experimental</p> <p>Nivel de la Investigación:</p> <p>DESCRIPTIVO-CORRELACIONAL</p>

<p>proveedoras de electricidad [10]. Por ello la búsqueda de fuentes alternativas de energía es importante, ya que uno de los problemas fundamentales a la hora de conseguir el aprovechamiento energético es disponer de dispositivos que fructifiquen al máximo la configuración de los mismos [11]. La recolección de energía mecánica de las carreteras que emplean material piezoeléctrico es una forma potencial de abordar este problema, y se han diseñado diversos recolectores de energía piezoeléctrica (PEH) utilizando diferentes materiales piezoeléctricos por muchos investigadores [12]. Esta energía piezoeléctrica puede llegar a ser utilizada por dispositivos como los celulares, reproductores y led's, que requieren de bajo voltaje para su carga eléctrica.</p>					
<p>Problema General: P.G.1 ¿Cómo la aplicación de la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras permitirá cargar eléctricamente equipos de bajo consumo, Callao 2022?</p> <p>Problemas Específicos P.E.1. ¿Cómo la implementación de la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras permitirá generar energía para equipos de bajo consumo, Callao 2022?</p> <p>P.E.2. ¿Cómo el uso de la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras permitirá mejorar el ahorro energético al utilizarse en equipos de bajo consumo, Callao 2022?</p>	<p>Objetivos Específicos: O.E.1. Implementar la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras para generar energía que alimente equipos de bajo consumo</p> <p>O.E.2. La recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras para mejorar el ahorro energético al utilizarse en equipos de bajo consumo</p>	<p>Hipótesis Específicas: H.E.1 Implementar la recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras generará energía que alimente equipos de bajo consumo</p> <p>H.E.2. La recolección de energía piezoeléctrica en las carreteras mejorará el ahorro energético al utilizarse en equipos de bajo consumo</p>	<p>Variable dependiente: Carga eléctrica de equipos</p> <p>Dimensiones e Indicadores:</p> <p>D1: Generación de energía</p> <p>11: Almacenamiento de energía eléctrica</p> <p>12: Potencia eléctrica</p> <p>D2: Ahorro energético</p> <p>11: Precio en el cobro de energía eléctrica</p> <p>12: Eficiencia energética</p>		<p>Población Y Muestra:</p> <p>Población:</p> <p>De lo expuesto por los autores, mi población es de tipo finita para el presente trabajo de investigación se identifica como población a una pista del distrito de Callao</p> <p>Muestra:</p> <p>Se considera como muestra a una pista del distrito de Callao, ya que la población es inferior de 50. Por lo tanto, la muestra es igual a la población</p>

10.2. Dimensionamiento del disco piezoeléctrico PZT



Especificación:

Frecuencia resonante (KHz) 4.0 ± 0.7

Impedancia resonante (Ω) ≤ 500 Capacitancia a 1KHz (pF) $28000 \pm 30\%$

Diámetro de la placa de metal (mm) (D) (mm) $\phi 15.0 \pm 0.2$

Diámetro de la placa de cerámica (mm) (d) (mm) $\phi 12.0 \pm 0.5$

Grosor total (mm) (T) (mm) 0.14 ± 0.03

Espesor de la placa de metal (mm) (t) (mm) 0.08 ± 0.02

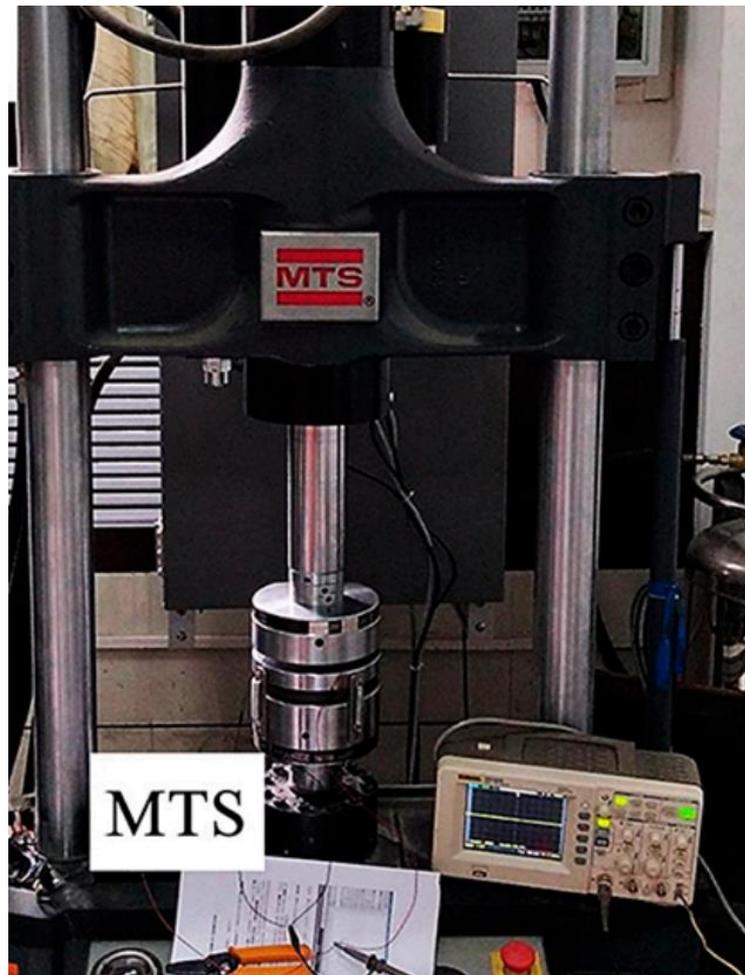
Material de metal Latón RoHS Sí Test estado básico:

Temp (20 ± 2 °C), Humedad (40 ~ 70% RH),

Presión de aire (860 ~ 1060hPa).

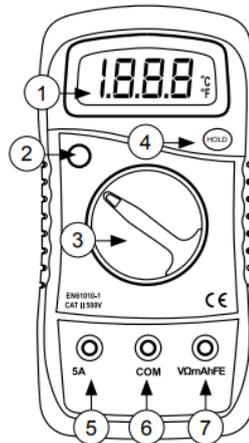
10.3. Dispositivo bajo prueba en una prensa

En esta prensa se puede utilizar como sistemas de prueba de materiales (MTS) para simular el peso de los vehículos al pasar por encima de la baldosa piezoeléctrica



10.4. Características del multímetro

Este aparato es un multímetro digital portátil que funciona con pilas, con un display de 3½ dígitos, para mediciones de voltaje CC, voltaje CA, corriente CC, resistencia, prueba de diodo, transistores, y test de continuidad sonoro.



Voltaje CC

RANGO	RESOLUCION	PRECISION
200mV	100µV	+/- (0.5% rdg + 3 dgt)
2V	1mV	+/- (0.8% rdg + 5 dgt)
20V	10mV	
200V	100mV	
500V	1V	+/- (1.0% rdg + 5 dgt)

Corriente CC

RANGO	RESOLUCION	PRECISION
200µA	0.1µA	+/- (1.8% rdg + 2 dgt)
2mA	1µA	
20mA	10µA	
200mA	100µA	+/- (2.0% rdg + 2 dgt)
5A	10mA	+/- (2.0% rdg + 10 dgt)

Voltaje CA

RANGO	RESOLUCION	PRECISION
200V	100mV	+/- (2.0% rdg + 10 dgt)
500V	1V	