

# Harvesting piezoelectric energy on a highway in Callao to charge low consumption equipment

Santiago Rubiños-Jimenez, Doctor<sup>1</sup>, Ricardo Gutierrez-Tirado, Maestro<sup>1</sup>, Carlos Damas-Flores, Doctor<sup>1</sup>, Niko Alarcon-Cueva, Maestro<sup>1</sup>, Juan Mendoza-Nolorbe, Maestro<sup>1</sup>, Jessica Meza-Zamata, Maestra<sup>1</sup> y Raul Castro-Vidal, Doctor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Callao, slrubinosj@unac.edu.pe, ragutierrez@unac.edu.pe, cmdamasf@unac.edu.pe, nkalarconc@unac.edu.pe, jnmendozan@unac.edu.pe, jrmezaz@unac.edu.pe, rpcastrov@unac.edu.pe

*Abstract-- Currently in Callao there are areas with high vehicle density, which reduces the useful life of the road. However, it is possible to take advantage of the mechanical energy generated by these vehicles when they are traveling on the roads to produce electrical energy. The objective of this study is to obtain electrical energy produced by vehicles traveling through the district of Callao to charge low-consumption equipment. In this simulation study, light and heavy load vehicles transiting through Callao, in areas with high vehicular traffic, were considered in order to analyze if the energy demand can be covered to charge low power consumption equipment. It was obtained in the tests that 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 kWh with an average traffic of 400 vehicles at a speed of 80 Km/h and that, when the accumulation of energy obtained on the road daily was measured, values between 13.97 kW/h and 33.18 kW/h were obtained at the moment with the lowest vehicle flow and the highest vehicle flow, respectively.*

*Keywords: Piezoelectric tile, clean energy, vehicular traffic*

# Cosecha de energía piezoeléctrica en una autopista del Callao para cargar equipos de bajo consumo

Santiago Rubiños-Jimenez, Doctor<sup>1</sup>, Ricardo Gutierrez-Tirado, Maestro<sup>1</sup>, Carlos Damas-Flores, Doctor<sup>1</sup>, Niko Alarcon-Cueva, Maestro<sup>1</sup>, Juan Mendoza-Nolorbe, Maestro<sup>1</sup>, Jessica Meza-Zamata, Maestra<sup>1</sup> y Raul Castro-Vidal, Doctor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Callao, slrubinosj@unac.edu.pe, ragutierrez@unac.edu.pe, cmdamasf@unac.edu.pe, nkalarconc@unac.edu.pe, jnmendozan@unac.edu.pe, jrmezaz@unac.edu.pe, rpcastrov@unac.edu.pe

**Resumen:** Actualmente en el Callao hay zonas con gran densidad vehicular lo que reduce la vida útil de la carretera. Sin embargo, se puede aprovechar la energía mecánica que generan estos vehículos cuando están transitando las pistas para producir energía eléctrica. El objetivo de este estudio es obtener energía eléctrica producida por los vehículos que transitan por el distrito de Callao para cargar equipos de bajo consumo. 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 realizaron pruebas con diferentes velocidades y diferentes tipos de vehículos para poder verificar la variación con respecto a la energía generada. Se obtuvo en las pruebas 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 80 Km/h y que, cuando se midió la acumulación de la energía que se obtuvo en la carretera diariamente se obtenían valores entre 13.97 kWh y 33.18 kWh en el momento con menor flujo vehicular y el mayor flujo vehicular respectivamente.

**Palabras clave:** Baldosa piezoeléctrica, energía limpia, tránsito vehicular.

## I. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía a lo largo del tiempo ha ido en aumento y se vuelve progresivo conforme la demanda aumenta, generando que las fuentes tradicionales para la obtención de combustible se agoten debido a la constante aparición de nuevas tecnologías y vehículos eléctricos que han comenzado a ocupar el parque automotor [1]. La aparición de una gran variedad de tecnologías en el sector energético, que aprovechan de manera más eficiente las diferentes fuentes de energía renovables, logró que esta fuera rentable haciéndolo más accesible a las personas lo que lo llevó en estos últimos años a su apogeo [2]. Entre las tecnologías utilizadas para generar energía se puede mencionar a la electromagnética, piezoeléctrica y electrostática debido a lo innovadoras y lo económicamente sustentables que son [3].

La energía piezoeléctrica es una de las que destaca al momento de aprovechar la energía vibratoria, ya que convierte la energía mecánica en eléctrica y viceversa de manera eficiente tomando en consideración piezoeléctricos con un alto coeficiente de tensión lo que hace esperanzador su uso en aplicaciones de energía renovable [4]. Actualmente, existen diversos estudios para el aprovechamiento de este fenómeno, que van desde ladrillos especiales en la acera para peatones, puntos de presión en carreteras [5] y vías férreas, hasta rompeolas especializados para zonas costeras [6].

En diferentes ciudades se viene incrementando el parque automotor lo que ha tenido un impacto en el desgaste de las carreteras sobre todo si se menciona a los vehículos de carga pesada que producen una gran cantidad de vibración [7]. En la ciudad de Lima y Callao circulan unos 28.000 vehículos de transporte público, entre buses, combis y cústers lo que aumenta la carga de trabajo y el gasto de mantenimiento. Sin embargo, los vehículos que circulan por las vías desprenden energía que con los dispositivos adecuados de almacenamiento se podría aprovechar para alimentar equipos de bajo consumo. Esta energía mecánica producida por los vehículos que circulan en la carretera se puede transferirse a las baldosas piezoeléctricas mediante las vibraciones para generar energía eléctrica [8]. Por ello en este estudio se determinó cuanta energía puede generarse en un tramo de perfil vial de la región Callao usando baldosas piezoeléctricas como fuente de energía limpia y renovable [9], por lo cual se evaluó diferentes situaciones en las que se analizó el flujo vehicular y el tipo de tránsito que se presenta en esta región con lo cual se pudo cuantificar la cantidad de energía producida.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### Análisis teórico por unidad de Piezoelectric Harvesting.

Antes de poder utilizar los piezoeléctricos para la cosecha de energía en las carreteras se debe evaluar distintos factores que permitan caracterizar sus propiedades eléctricas del piezoeléctrico y obtener la cantidad de energía generada por el paso de los vehículos para ello es necesario someterlos a una excitación extrema [10]. La piezoelectricidad cuenta con bases en las Normas IEEE que menciona la presión de excitación variable en el tiempo, generada por diferentes indicadores como la deformación S, desplazamiento eléctrico D, el campo eléctrico E y la tensión T cuya relación se puede interpretar de la siguiente ecuación:

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).  
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).  
DO NOT REMOVE

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

Donde:

- a.  $e_{33}$ : Coeficiente piezoeléctrico
  - b.  $C_3^E$ : Constante de rigidez elástica bajo un campo eléctrico estacionario
  - c.  $\epsilon_{33}^S$ : 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

A continuación, vemos en la figura 1 el diagrama de cuerpo libre de las diferentes fuerzas que interactúan con el neumático del vehículo y el pavimento

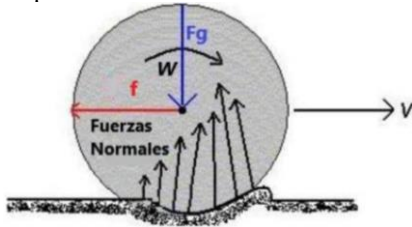


Figura 1. Diagrama de fuerzas del neumático

Debido a esta energía mecánica que es la suma de la energía potencial y la energía cinética, como se puede ver en la ecuación 3, se puede producir energía eléctrica a través del piezoeléctrico que aprovecha las constantes vibraciones que se producen en el asfalto [10].

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

Donde:

- Emec: Energía mecánica.
- Ep: Energía potencial.
- Ec: Energía cinética.

### Fundamentos y matemáticas de la piezoelectricidad

Existen 2 modos de operación principales para el uso de piezoeléctricos entre los que se encuentran el modo 33 y 31 en los cuales la dirección de la vibración es perpendicular a la dirección de polarización como se puede ver en la tabla 3. Estos modos son utilizados mayormente para aplicaciones de generación de energía. Sin embargo, el modo 33 es más utilizado, debido al mayor coeficiente de acoplamiento [11].

Tabla 1. Formulaciones de modos de operación piezoeléctrica

	Mode 33	Mode 31
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:

Le energía de deformación permite calcular la capacidad del material para transformar energía vibratoria en energía eléctrica para ello se utiliza la ecuación 4

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

donde

- $\epsilon_R$ : Matriz de deformación
- $\sigma'$ : Matriz de tensión
- E: Vector de campo eléctrico
- D: Vector de desplazamiento eléctrico

$$\begin{aligned} \delta W_{int} &= \delta W_{int}^d + \delta_{int}^e = \int_V \delta(\epsilon_R^T \sigma') dV + \int_V \delta(\bar{E}^T D) dV \\ &= \int_V \delta \epsilon_R^T (S_2 C' S_T) \epsilon_G dx + \int_V \bar{E}^T e^T \delta \epsilon_R dV \quad (5) \\ \delta W_{int}^e &= \int_V \delta \bar{E}^T e^T \epsilon_R dV - \int_V \delta \bar{E}^T \epsilon^S \bar{E} dV \quad (6) \end{aligned}$$

En la ecuación 4 se puede apreciar que se considera a la deformación elástica del piezoeléctrico y a la energía electrostática que se genera cuando ocurre una diferencia de potencial como resultado de una deformación mecánica [12].

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 2. La relación entre las deformaciones transversales y longitudinales es constante, siempre y cuando el material se encuentre en el rango elástico de esfuerzos

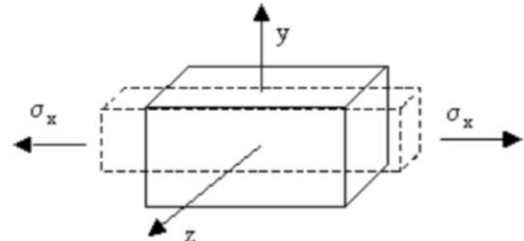


Figura 2. Las direcciones de la deformación de un material aplicando una fuerza

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:

$\mu$ : 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:

Es una medida representada por k que calcula que tan eficientemente el material piezoeléctrico puede transformar la energía mecánica en energía eléctrica o en sentido contrario. Matemáticamente este coeficiente elevado al cuadrado expresa la relación entre la entrega de energía convertida y el ingreso de energía suministrada como se puede ver en la ecuación 9, mientras mayor sea el valor de k mayor será la eficiencia de conversión.

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

En aplicaciones prácticas se busca contar con un elevado valor del coeficiente  $k^2$  para aprovechar mejor la energía mecánica de las estructuras vibrantes que se recolectan en los materiales piezoeléctricos, ya que en el caso de la generación de energía eléctrica este valor permitirá que se identifique su utilidad en aplicaciones de baja potencia [14].

### Sensor piezoeléctrico

El sensor piezoeléctrico aprovecha la propiedad piezoeléctrica de ciertos tipos de cristales como el cuarzo, y cerámicas como el titanato de bario para generar una carga eléctrica en respuesta a tensiones mecánicas, ya que el sensor piezoeléctrico al ser tensionado producirá una polarización eléctrica en el material creando un campo eléctrico. En la figura 3 se puede visualizar las partes de un sensor piezoeléctrico [15].

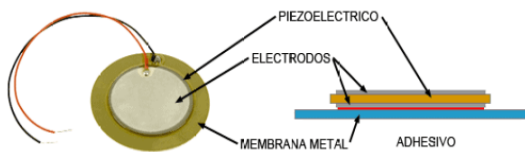


Figura 3. Sensor piezoeléctrico

### Tipos de materiales piezoeléctricos:

Se pueden usar varios materiales piezoeléctricos en la generación de energía. La Tabla 2 presenta la potencia máxima generada por materiales piezoeléctricos: fluoruro de polivinilideno (PVDF), cerámica piezoeléctrica, fibra piezoeléctrica, entre otros [4].

Tabla 2. Pico de potencia generado por materiales piezoeléctricos

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

### Partes y funcionamiento de baldosa piezoeléctrica

La baldosa piezoeléctrica se compone principalmente de tres partes:

- Nivel superior: Es la superficie que tiene contacto directo con el neumático del vehículo y que puede ser de diferentes materiales como la cerámica, el polímero entre otros.

- Nivel intermedio: En este lugar se colocan los sensores piezoeléctricos que estarán unidos con los muelles para generar energía cuando el vehículo haga contacto con el nivel superior.

- Nivel inferior: En esta parte se instala la parte electrónica que recibe la energía eléctrica y que adicionalmente se configura para transformar la corriente alterna en corriente continua en la misma baldosa y luego la almacena en una batería [16].

### Cantidad y distribución de los piezoeléctricos

Para poder obtener buenos resultados a la hora de generar energía debemos tomar en cuenta la distribución de los piezoeléctricos, ya que sin importar la cantidad que se utilice podemos obtener poca eficiencia sino consideramos que la fuerza que se genera por el paso de un vehículo no es igual en toda la superficie de la baldosa y que esta fuerza no ocurre en el mismo instante de tiempo. Sin embargo, lo que si debemos tener en cuenta es que la energía que se genera en el piezoeléctrico es directamente proporcional a la fuerza que recibe en él. Teniendo en cuenta lo anterior es que se opta por utilizar los piezoeléctricos conectados en paralelo, ya solo producirá energía el piezoeléctrico que tenga la mayor presión instantánea lo cual permite tener una adaptabilidad dinámica a las condiciones cambiantes del entorno maximizando la eficiencia de generación de carga eléctrica, lo cual disminuye la cantidad de piezoeléctricos a utilizar. En esta investigación las baldosas tuvieron un espacio de 2.5 m a lo largo de la carretera y un espacio horizontal es de 1.75 m. Se colocarán un total de 8 baldosas piezoeléctricas que tendrán 4 piezoeléctricos cerca de cada uno de los muelles y se instalaron en el carril principal y a lo largo del recorrido de las ruedas de los vehículos

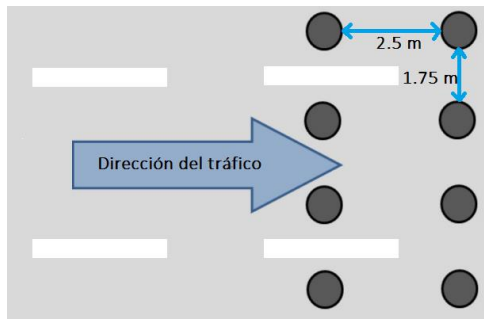


Figura 4. Distribución de los piezoelectricos

### Diseño del circuito general

En el diseño del circuito rectificador, el valor del voltaje de entrada es aproximadamente de 25 V. A partir de este valor, se elige el puente rectificador monofásico KBP 202G, los capacitores (C1, C2 y C3 todas de 0.1  $\mu$ F) y el regulador de voltaje positivo L7812CV para construir el circuito de recolección de energía. El resultado es un voltaje de salida a 12 V. Las dos celdas utilizadas son baterías de iones de litio con una capacidad de 3500 mAh, operando a 3.7 V [17]. En la etapa del convertidor de voltaje se utiliza el convertidor DC-DC XL6009 que tiene como función proporcionar un voltaje de salida constante que supere al voltaje de entrada o de carga. El convertidos tiene la capacidad de soportar corrientes de salida de hasta 2.5 A, con un rango de voltaje de entrada de 5 V a 32 V y voltaje de salida entre 7 V a 35 V. Los circuitos de recolección de energía se muestran en la figura 4.

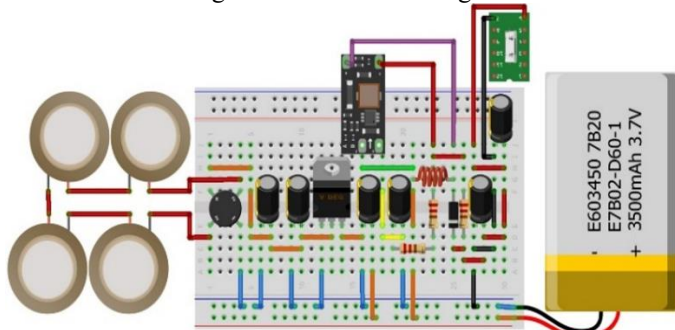


Figura 4. Esquema del circuito electrónico general

### Diseño mecánico inicial del sistema para la cosecha de energía piezoeléctrica

Para el diseño mecánico del dispositivo, utilizamos unos muelles que ayuden a una mayor generación de energía mecánica, estos muelles tienen una base y al mismo tiempo soportan la cobertura que es la parte que estará en contacto con la llanta de los vehículos, como se muestra en la Figura 5. La baldosa piezoeléctrica tiene un área de contacto de 900cm<sup>2</sup> [18].

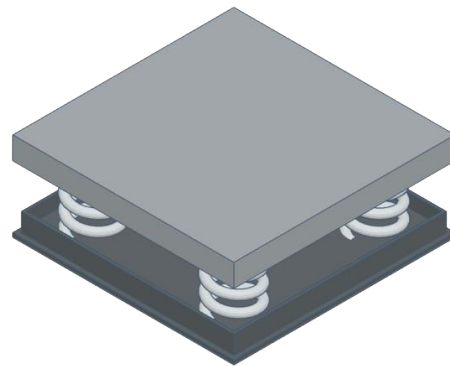


Figura 5. Diseño mecánico del sistema piezoeléctrico

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 15 cm, un diámetro de 5 cm y una constante de 7.82 kgf/mm en las cuatro esquinas del marco.

### 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 6), durante 4 semanas calendarios.

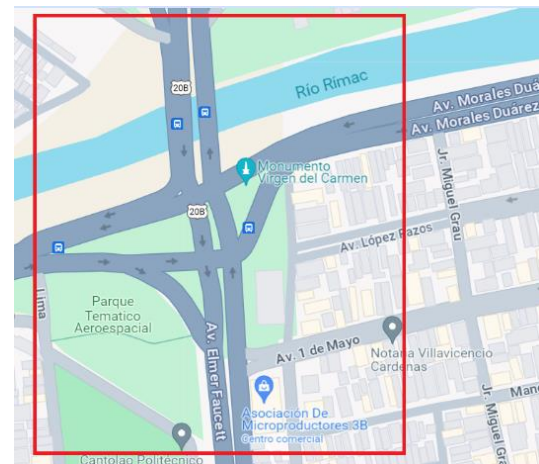


Figura 6. Intersección de la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez

## III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la tabla 3 se presenta la cantidad de cada tipo de vehículo como los buses, camiones, carros y combis que circularon desde las 6 am hasta las 9 p.m. en intervalos de 1 hora durante un periodo de 4 semanas en la intersección de la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez para calcular el volumen de tráfico vehicular. Se puede ver que el tipo de vehículos que más transitan por esta parte de la carretera son los carros que en su valor pico llegó a 6146 carros y el vehículo de menos



circulación son las motos con un valor máximo de 3389, teniendo un valor promedio de 23 117 vehículos que transitan semanalmente

Tabla 3. Frecuencia mensual de tránsito vehicular, correspondiente al periodo de 4 semanas

Se analizó diferentes tipos de tráfico con diferentes velocidades considerando los 40, 60, 80 Km/h como se puede apreciar en la figura 7 donde se obtuvo que la energía mínima producida es de 5.02 kWh tomando en cuenta que el trafico 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

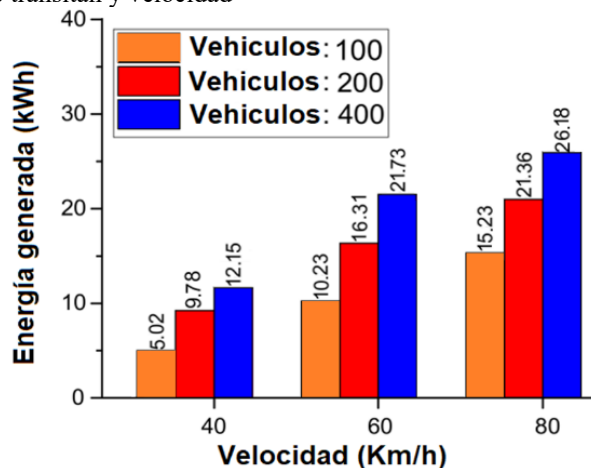


Figura 7. Generación de energía mediante el movimiento de vehículos a diferentes velocidades y trafico

En la figura 8, 9, 10 y 11 se colocaron los promedios de la cantidad de vehículos que transitaron durante la primera, segunda, tercera y cuarta semana respectivamente, tomando en cuenta cada hora en el horario de 6 de la mañana hasta las 9 de la noche, todo esto con la finalidad de poder identificar las variaciones que se presentan en la generación de energía durante el día en la carretera.

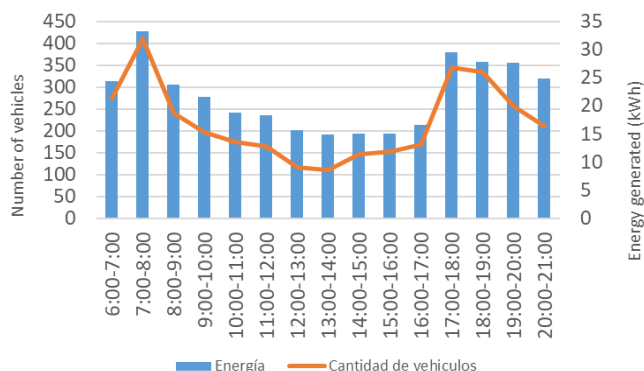


Figura 8. Número de vehículos y energía producida durante la semana 1

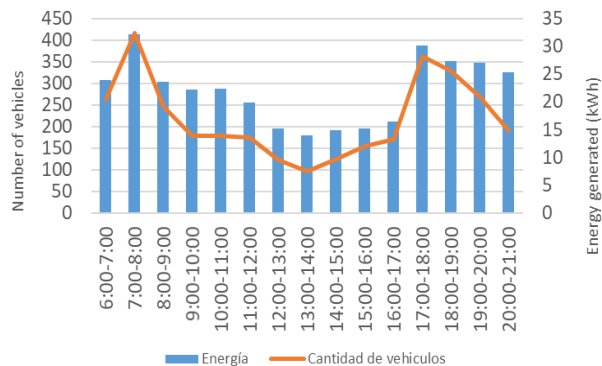


Figura 9. Número de vehículos y energía producida durante la semana 2

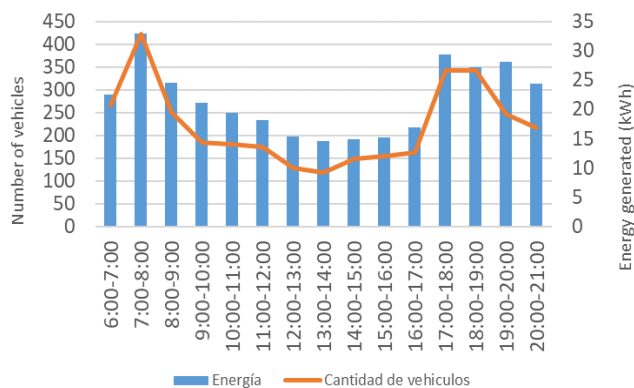


Figura 10. Número de vehículos y energía producida durante la semana 3

"Generación de Energía Piezoeléctrica en la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez para cargar equipos de bajo Consumo "						
Fecha: 06 de noviembre al 03 de diciembre						
Ubicación: Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez						
Semana	Buses	Camiones	Carros	Motos	Combis	Total
1	5342	3427	6108	3592	4782	23251
2	5216	3468	6119	3457	4796	23056
3	5381	3321	6146	3389	4872	23109
4	5291	3421	6075	3451	4814	23052
Promedio						23117



Figura 11. Número de vehículos y energía producida durante la semana 4

#### IV. CONCLUSIONES

#### REFERENCIAS

Se concluye que la intersección de la Av. Elmer Faucett y la Av. Morales Duárez tiene un alto flujo vehicular como se puede ver en la tabla 2 y que se obtiene una gran cantidad de energía al implementar el sistema piezoeléctrico como se puede ver en la figura 8, 9, 10 y 11 en donde notamos que mientras más vehículos transiten mayor será la cantidad de energía producida para poder cargar equipos de bajo consumo.

La producción de energía piezoeléctrica aumenta de acuerdo a la cantidad de vibración que produce la velocidad del vehículo al pasar por encima de la superficie de la baldosa, en este caso notamos que mientras mayor velocidad será mayor la producción de la energía, aunque esto no es un factor determinante debido a que también dependerá del peso que tenga el vehículo y el tipo de vehículo.

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

En resumen, la energía recolectada de esta fuente de energía depende de muchos factores, como la continuación de la fuerza mecánica recibida, el flujo de los vehículos, la velocidad de los vehículos, el peso de los vehículos, el tipo de vehículo, la distribución de los piezoeléctricos en la baldosa, la eficiencia del circuito de recolección de energía y los materiales piezoeléctricos.

#### V. RECOMENDACIONES

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.

Se debe 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.

#### AGRADECIMIENTO

Agradecer a la Universidad Nacional del Callao y al Vicerrectorado de investigación por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de la investigación.

- [1] P. S. Chaiyan Jettanasen y A. Ngaopitakkul, «Conversion of Mechanical Energy to Electrical Energy Using Piezoelectric Materials for Bicycle Lane Lighting Systems,» *Applier Sciences*, 2022.
- [2] A. M. Malmcrona, «Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2018.
- [3] A. Talal Bin, A. Waqas Nazir, R. Tanzeel ur, H. Faraz ul, Z. Ubaid ur Rehman y K. Sher Asif, «Energy Generation Potential through utilization of Piezoelectric materials in Smart Motorway System (SMS) of Pakistan,» *IEEE*, 2019.
- [4] A. Aabid, M. A. Raheman, Y. E. Ibrahim, A. Asraar, H. Meftah, P. Bisma, P. Nagma y J. M. Zayan, «A Systematic Review of Piezoelectric Materials and Energy Harvesters for Industrial Applications,» *Sensors* 2021, 2021.
- [5] S. Kim, J. Shen y M. Ahad, «Piezoelectric-Based Energy Harvesting Technology for Roadway Sustainability,» *International Journal of Applied Science and Technology*, Statesboro, 2015.
- [6] D. O. Urroz-Montoya, J. R. Alverto-Suazo, J. R. García-Cabrera y C. H. Ortega-Jiménez, «Piezoelectricity: a literature review for power generation support,» *MATEC Web of Conferences*, 2019.
- [7] Q. Zhao, L. Wang, K. Zhao y H. Yang, «Development of a Novel Piezoelectric Sensing System for Pavement Dynamic Load Identification,» *Sensors* 2019, 2019.
- [8] J. Perelló Ibarra, «Estudio de la energía obtenida mediante dispositivos piezoeléctricos incrustados en el pavimento de carreteras,» *Escuela Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*, Barcelona, 2020.
- [9] F. R. Meza López, «Estudio de la captación de energía eléctrica a través del efecto piezoeléctrico para aplicaciones de baja potencia,» *Universidad Nacional Del Centro del Perú, Huancayo*, 2022.
- [10] J. A. Paz Colchon, «Generación de energía piezoeléctrica a partir de la vibración de los perfiles viales del pavimento en la región Lambayeque,» *Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque*, 2020.
- [11] Y. Zhang, H. Zhang, C. Lü, Y. Chen y W. Ji, «Piezoelectric energy harvesting from roadway deformation under various traffic flow conditions,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Hangzhou, 2020.
- [12] J. M. Ramírez, «Desarrollo de dispositivos recolectores de energía de fuentes vibratorias,» *Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca*, 2019.
- [13] A. F. Hoyos Calvache, «Prototipo de baldosa piezoeléctrica generadora de energía de baja tensión,» *Corporacion Universitaria Autonoma Del Cauca, Cauca*, 2018.
- [14] A. Menéndez Melé y A. Arribalzaga Jové, «Desarrollo de un prototipo de baldosa generadora de energía eléctrica a partir de la piezoelectricidad y almacenamiento de la energía producida,» *Escuela Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona*, 2022.
- [15] J. T. Bernal Hernandez y H. F. Castillo Lozano, «Estudio de elementos necesarios para la implementación de ecobaldosas en la universidad católica de colombia,» *Universidad Catolica de Colombia, Bogota*, 2020.
- [16] E. A. OJEDA OJEDA, «Diseño de instalación de baldosas piezoeléctricas para iluminar multicancha en la sede viña del mar,» *Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar*, 2019.
- [17] C. Jettanasen, P. Songsukthawan y A. Ngaopitakkul, «Development of Micro-Mobility Based on Piezoelectric Energy Harvesting for Smart City Applications,» *Sustainability* 2020, 2020.
- [18] T. H. Pham, T. D. Bui y T. T. Dao, «A High-Reliability Piezoelectric Tile Transducer for Converting Bridge Vibration to Electrical Energy for Smart Transportation,» *Micromachines* 2023, Hanoi, 2023.