



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

**Diseño de prototipo para la evaluación de generación eléctrica con
materiales piezoeléctricos**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTORES:

Yengle Medina, Nelson Eleasar (orcid.org/0000-0002-6124-2391)

Zerpa Sanchez, Yrving Manuel (orcid.org/0000-0001-9755-551X)

ASESOR:

Dr. Luján López, Jorge Eduardo (orcid.org/0000-0003-1208-1242)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Generación, Transmisión y Distribución

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO – PERÚ

2024

Declaratoria de autenticidad del asesor



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, LUJÁN LÓPEZ JORGE EDUARDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Diseño de prototipo para la evaluación de generación eléctrica con materiales piezoeléctricos", cuyos autores son YENGLÉ MEDINA NELSON ELEAZAR, ZERPA SANCHEZ YRVING MANUEL, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 4.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 01 de Agosto del 2024

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
LUJÁN LÓPEZ JORGE EDUARDO DNI: 17897692 ORCID: 0000-0003-1208-1242	Firmado electrónicamente por: JLUJAN el 01-08- 2024 19:29:29

Código documento Trilce: TRI - 0842873



Declaratoria de originalidad de los autores



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, YENGLER MEDINA NELSON ELEAZAR, ZERPA SANCHEZ YRVING MANUEL estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Diseño de prototipo para la evaluación de generación eléctrica con materiales piezoeléctricos", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
YRVING MANUEL ZERPA SANCHEZ DNI: 76468800 ORCID: 0000-0001-9755-551X	Firmado electrónicamente por: YZERPAS el 01-08- 2024 19:57:57
NELSON ELEAZAR YENGLER MEDINA DNI: 75078946 ORCID: 0000-0002-6124-2391	Firmado electrónicamente por: YENGLERN el 01-08- 2024 20:03:57

Código documento Trilce: TRI - 0842874

Dedicatoria

*Principalmente a nuestros padres
que nos han apoyado
incondicionalmente durante toda la
carrera universitaria.*

- Los autores

Agradecimiento

A los docentes universitarios y profesionales que nos ayudaron a realizar la presente investigación, así como también a la propia Universidad César Vallejo por brindarnos los recursos necesarios.

- Los autores

Índice de contenidos

Declaratoria de autenticidad del asesor	ii
Declaratoria de originalidad de los autores	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Índice de contenidos	vi
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Resumen	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN	7
II. METODOLOGÍA.....	15
III. RESULTADOS	17
IV. DISCUSIÓN.....	47
V. CONCLUSIONES.....	49
VI. RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS	51
ANEXOS	28

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los materiales piezoeléctricos más populares.....	14
Tabla 2. Matriz morfológica para el diseño del prototipo.....	17
Tabla 3. Tabla de puntuación para la matriz morfológica	18
Tabla 4. Matriz de selección ponderada para el prototipo	18
Tabla 5. Resultados de los piezoeléctricos en serie 20x20 de 2.50 cm.....	24
Tabla 6. Resultados de los piezoeléctricos en serie 20x20 de 4 cm.....	25
Tabla 7. Resultados de los piezoeléctricos en serie 25x25 de 2.50 cm.....	26
Tabla 8. Resultados de los piezoeléctricos en serie 25x25 de 4 cm.....	27
Tabla 9. Resultados de los piezoeléctricos en serie 30x30 de 2.50 cm.....	29
Tabla 10. Resultados de los piezoeléctricos en serie 30x30 de 4 cm.....	30
Tabla 12. Resultados obtenidos de los piezoeléctricos en paralelo 20x20	32
Tabla 13. Resultados de los piezoeléctricos en paralelo 25x25 de 2.50 cm.....	34
Tabla 15. Resultados obtenidos de los piezoeléctricos en paralelo 30x30	36
Tabla 16. Resultados obtenidos de los piezoeléctricos en paralelo 30x30	37
Tabla 17. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 2.5 cm.....	39
Tabla 18. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 4 cm.....	40
Tabla 19. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 25x25 de 4 cm.....	41
Tabla 20. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 2.5 cm.....	43
Tabla 21. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 4 cm.....	44
Tabla 22. Gastos del prototipo piezoeléctrico	46

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Ilustración del efecto piezoeléctrico en una placa de cuarzo	12
<i>Figura 2.</i> Elementos de transducción piezoeléctricos.	13
<i>Figura 3.</i> Modelamiento de la estructura base en SolidWorks, usando unidades internacionales (SI).	19
<i>Figura 4.</i> Modelamiento del acople de la base del módulo piezoeléctrico, realizado en SolidWorks con unidades internacionales (SI).	20
<i>Figura 5.</i> Módulo piezoeléctrico dimensionado, ensamblado y remasterizado en SolidWorks.	21
<i>Figura 6.</i> Simulación de desplazamiento en SolidWorks Simulation.	22
<i>Figura 7.</i> Simulación de esfuerzos de Von Misses en SolidWorks Simulation.	22
<i>Figura 8.</i> Simulación de esfuerzos de Von Misses en SolidWorks Simulation	23
<i>Figura 9.</i> Conexión en serie de 16 piezas piezoeléctricos, formando un área de 20x20 centímetros.	23
<i>Figura 10.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en serie.....	24
<i>Figura 11.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en serie.....	25
<i>Figura 12.</i> Conexión en serie de 16 piezas piezoeléctricos, formando un área de 25x25 centímetros.....	26
<i>Figura 13.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 2.5 cm en serie.....	27
<i>Figura 14.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 4 cm en serie.....	28
<i>Figura 15.</i> Conexión en serie de 16 piezas piezoeléctricos, formando un área de 30x30 centímetros.....	28
<i>Figura 16.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 2.5 cm en serie.....	29
<i>Figura 17.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 30x30 de 4 cm en serie.....	30
<i>Figura 18.</i> Conexión en paralelo de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área 20x20 centímetros.....	31
<i>Figura 19.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en paralelo.....	32
<i>Figura 20.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en paralelo.....	33

<i>Figura 21.</i> Conexión en paralelo de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área 25x25 centímetros.....	33
<i>Figura 22.</i> Relación resultante para el módulo 25x25 de 2.5 cm en paralelo.....	34
<i>Figura 23.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 4 cm en paralelo.....	35
<i>Figura 24.</i> Conexión en paralelo de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área 30x30 centímetros.....	36
<i>Figura 25.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 30x30 de 2.50 cm en paralelo...	37
<i>Figura 26.</i> Relación para el módulo piezoeléctrico 30x30 de 4 cm en paralelo.....	38
<i>Figura 27.</i> Conexión mixta de 16 piezas piezoeléctricas con un juego en paralelo y tres en serie, formando un área 20x20 centímetros.	38
<i>Figura 28.</i> Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en conexión mixta de un juego en paralelo y tres en serie.....	39
<i>Figura 29.</i> Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en conexión mixta de un juego en paralelo y tres en serie.....	40
<i>Figura 30.</i> Conexión mixta de 16 piezas piezoeléctricas con un juego en paralelo y tres en serie, formando un área 25x25 centímetros.....	41
<i>Figura 31.</i> Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 4 cm en conexión mixta de un juego en paralelo y tres en serie.....	42
<i>Figura 32.</i> Conexión mixta de 16 piezas piezoeléctricas con dos juegos en paralelo y dos en serie, formando un área 25x25 centímetros.	42
<i>Figura 33.</i> Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en conexión mixta de dos juegos en paralelo y dos en serie.	43
<i>Figura 34.</i> Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en conexión mixta de dos juegos en paralelo y dos en serie.	44

Resumen

Para el presente estudio, se estableció como objetivo elaborar un diseño de prototipo para la evaluación de generación eléctrica con materiales piezoeléctricos. Empleando un tipo de investigación aplicada y de diseño experimental, se propuso variables cuantitativas relacionadas al objeto de estudio, para las cuales se realizó una guía de observación de campo como instrumento de la investigación. Entre los resultados encontrados, se obtuvo un dimensionamiento de un módulo compuesto por 16 sensores piezoeléctricos, los cuales mostraron mayor uniformidad en la generación de energía eléctrica al ser conectados en serie. Además, se pudo evidenciar que la energía generada por una carga distribuida de 70 kg fue de 0.0686 Watts en corriente continua, obteniendo una eficiencia de 3.77%, pero un retorno de la inversión de 7 meses.

Palabras clave: Piezoeléctrico, sensores, potencia, eficiencia

Abstract

For the present study, the goals established was to develop a prototype design for the evaluation of electrical generation with piezoelectric materials. Using a type of applied research and experimental design, quantitative variables related to the object of study were proposed, for which a field observation guide was made as a research instrument. Among the results found, a sizing of a module composed of 16 piezoelectric sensors was obtained, which showed greater uniformity in the generation of electrical energy when connected in series. Furthermore, it was evident that the energy generated by a distributed mass of 70 kg was 0.0686 Watts in direct current, obtaining an efficiency of 3.77%, but a return on investment of 7 months.

Keywords: Piezoelectricity, sensors, power, efficiency

I. INTRODUCCIÓN

La creciente atención que ha recibido en los últimos años la tecnología de la generación de energía mediante el movimiento, se ha vuelto significativo tanto en ámbitos comerciales como académicos. Sin embargo, los problemas que aborda esta tecnología es la complejidad asociada con el suministro eléctrico, el cableado y la transmisión de sensores inalámbricos. Es por ello, que se han llevado a cabo numerosas investigaciones centradas en mejorar la eficiencia y funcionalidad de los sensores de efecto piezoeléctricos (Ye et al., 2023).

Múltiples investigaciones resaltan la importancia continua de optimizar y/o mejorar los dispositivos o equipos de generación y consumo de energía eléctrica, especialmente en el contexto de baja eficiencia energética, así mismo destacan la diversidad de mecanismos naturales y estrategias de ingeniería que se exploran para incrementar la eficiencia en la generación y consumo de energía eléctrica en una determinada planta o industria (Wang, 2021).

La versatilidad de los materiales piezoeléctricos es la capacidad de producir carga eléctrica utilizando cualquier fuente de movimiento recurrente, el principio de funcionamiento se basa en generar una diferencia de potencial cuando se someten a cargas cíclicas. Por lo tanto, la eficiencia del dispositivo está en función principalmente por la frecuencia en la que se produce los movimientos mecánicos. Además, entre las múltiples utilidades, la principal sería el empleo de estos dispositivos para producir energía eléctrica en baja tensión utilizando el movimiento de las personas al caminar (Su Han y Ko, 2021).

Ante la problemática encontrada formulamos la siguiente pregunta: ¿Cómo diseñar un prototipo para la evaluación de generación eléctrica con materiales piezoeléctricos?, según los siguientes cuestionamientos específicos: ¿Cómo evaluar los materiales piezoeléctricos para la generación de electricidad?, ¿Cómo dimensionar un prototipo para la evaluación de generación eléctrica con material piezoeléctrica?, ¿Cómo evaluar la generación eléctrica con diferentes materiales y configuraciones piezoeléctricos?, ¿Cómo evaluar los costos para la evaluación de generación eléctrica con material piezoeléctrico?

Es importante destacar que en la nación peruana las fuentes de energías son

las no renovables, además de existir una clara proyección creciente de la demanda por energía eléctrica y en conjunto con el creciente interés de la población en adoptar fuentes de generación eléctrica sostenibles (Osinergmin, 2019). Se crean las condiciones propicias para aprovechar los dispositivos piezoeléctricos, los cuales cobran relevancia, debido a que pueden ser utilizados como fuentes de energía eléctrica alternativas que suministren en equipos de bajo consumo la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.

El objetivo general propuesto en la investigación, es la elaboración del diseño de un prototipo para la evaluación de generación eléctrica con materiales piezoeléctricos, el cual se ramifica en múltiples objetivos específicos a conseguir. Primeramente, el dimensionamiento de las alternativas de diseño en los componentes del prototipo. Seguidamente, ejecución del modelamiento del diseño seleccionado y simulación mediante un programa CAD. Continuamente, evaluación de la generación eléctrica del prototipo. Finalmente, el cálculo del nivel de factibilidad del proyecto.

En la investigación se considera como hipótesis que los materiales piezoeléctricos de asfalto y cerámico son los que disponen de la máxima eficiencia permisible en el mercado peruano.

El respaldo para este proyecto se avala en las diferentes investigaciones, las cuales argumentan aspectos relacionados a la utilización de sensores piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica.

Heller, Teixeira, Jeremías, Brusamarello & Pérez (2023), en su artículo de investigación orientado al diseño industrial, buscó elaborar una cosechadora fija al pavimento compuesta por sensores piezoeléctricas, utilizando un muestro no probabilístico. Para el estudio, empleó una guía de observación de campo aplicada para la recopilación de datos técnicos, considerando como dimensiones el diseño de la cosechadora piezoeléctrica y el entorno de la misma. En esta investigación se encontró que la generación de energía eléctrica mediante el tráfico vial es factible y que se producía suficiente energía como para alimentar focos LED. Concluyendo que el diseño a pequeña escala logró soportar el tráfico y el clima durante un largo periodo de tiempo, pero que la producción energética es muy reducida como para alimentar equipos de mayor consumo de potencia, por lo tanto, el autor sugiere la instalación

de diseños similares donde haya mayor flujo de tráfico como autopistas, peajes, entre otros.

Lv, Hong, Ahmad, Li, Wu & Huang (2023) en su artículo científico orientado al diseño industrial, buscó proponer un diseño flexible de un sistema de producción piezoeléctrico con un material nanocompuesto, utilizando un muestro no probabilístico. Para el estudio, se utilizó una guía de observación de campo, teniendo como dimensiones el diseño del sistema piezoeléctrico y el material del sensor. En la investigación se encontró que cada material nanocompuesto presente múltiples beneficios y desventajas, dependiendo de la aplicación del sensor piezoeléctrico. La investigación concluye que el diseño de sistemas piezoeléctricos de nanocompuestos podría simbolizar un drástico beneficio para el desarrollo del Machine Learning y la inteligencia artificial (IA).

Dewanjee & Shabiul (2023) en su artículo de investigación enfocado en el área biomédica, buscó elaborar un dispositivo biomédico en base a un sistema de generación piezoeléctrica en conjunto con una viga tipo V, el cual tendría el propósito de reemplazar a otros dispositivos médicos que tenían limitaciones de uso energético, el estudio utilizó una muestra no probabilística. En la investigación se obtuvo que el diseño piezoeléctrico con forma tipo V transformaba satisfactoriamente la energía mecánica en energía eléctrica, la cual fue suministrada a los equipos biomédicos. La investigación concluye que el sistema piezoeléctrico tipo V diseñado suministra una potencia promedio de 10 μ W en bajo voltaje.

Del artículo se rescata la ecuación de eficiencia en un sistema piezoeléctrico, la cual se plasma a continuación.

$$\eta = \frac{P_{eléctrica}}{E_{mecánica}} \quad (1.1)$$

Dónde:

$P_{eléctrica}$ es la potencia eléctrica saliente en los terminales del sistema piezoeléctrico.

$E_{mecánica}$ es la energía mecánica externa entrante al sistema piezoeléctrico.

η es la eficiencia expresada porcentualmente.

De igual forma, el artículo indica que la fórmula para el cálculo de la energía mecánica se puede determinar usando como base la ecuación del sistema masa – resorte.

$$E_{mecánica} = \frac{F \times d}{t} \quad (1.2)$$

Dónde:

F es la fuerza externa empleada en Newtons.

d es la longitud deformada del material en metros.

t es la duración de la interacción de la fuerza con el material.

Feilong Ye, Zhiming Liu, Xiaoxiao Zhu, Weihao Zhu, Guojun Cai & Long Wang (2023), en su artículo de investigación centrado en el diseño electromecánico, buscó elaborar un prototipo de un equipo piezoeléctrico adherido internamente en el asfalto y activado mediante cargas cíclicas, utilizando un muestreo no probabilístico. Para el estudio, se empleó una guía de observación de campo para la recopilación de datos del entorno, teniendo como dimensiones el sistema piezoeléctrico y las propiedades del pavimento. En esta investigación se encontró que el sistema piezoeléctrico, posicionado internamente en el pavimento, producía una potencia máxima de 5.05×10^{-5} Watts bajo cargas externas variables. Concluyendo que el prototipo generaba una potencia de salida similar a la simulación por software realizada previamente, siendo esta de muy baja magnitud por las condiciones en la que el sistema fue instalado.

Aabid, Raheman, Ibrahim, Anjum, Hrairi, Parveez, Parveen y Zayan (2021), orientada a la generación de energía, buscó recopilar información especializada en los sensores piezoeléctricos y sus aplicaciones en la producción de energía eléctrica, utilizando un muestreo no probabilístico. Para el estudio se utilizó una ficha de registro y como dimensiones los materiales piezoeléctricos y la producción de energía. La investigación determinó que la tecnología piezoeléctrica es factible para la producción de energía, especialmente utilizando el tránsito vehicular o peatonal. Sin embargo, el autor concluye que las grandes desventajas como la producción de muy bajo voltaje, la producción de muy baja potencia y las pérdidas de energía durante la conversión de la misma, limita inmensamente la implementación a gran escala de los sensores piezoeléctricos.

En investigaciones realizadas a nivel internacional, se pudo encontrar a Hyeon Su Han y Junghyuk Ko (2021), quien en su artículo de investigación desarrollada en Busan del país de Corea del Sur, buscaron una optimización de la generación de

energía basada en la deformación cerámica piezoeléctrica para aplicaciones de recolección de energía con energía renovables, siendo su muestra la energía oceánica, En este estudio, se utiliza un sistema de recolección de energía piezoeléctrica para mejorar la eficiencia de la energía de las olas y la energía de las vibraciones, concluyendo que con la generación de energía piezoeléctrica se puede recolectar energía útil a partir de energía que tiene baja eficiencia de producción.

Del artículo se rescata la ecuación de potencia generada por el sensor piezoeléctrica, la cual se muestra a continuación.

$$P = V \times I \quad (1.3)$$

Dónde:

V es el voltaje en los terminales del sensor

I es la corriente eléctrica medida

P es la potencia eléctrica en Watts.

Nan Wu, Binbao & Quan Wang (2021), en su artículo científico orientado al diseño industrial, donde buscó elaborar una estructura para la recolección eficiente de energía piezoeléctrica de alta potencia, utilizando un muestreo no probabilístico. Para el estudio, se empleó una guía de observación de campo que permitió la recolección de las características técnicas de diseño, utilizando como dimensiones el diseño de la estructura y la potencia generada. En esta investigación se encontró un diseño funcional que genera energía a gran escala utilizando fuentes de vibración externa de diferentes medios. Concluyendo que ciertas propiedades de los materiales piezoeléctricos limitan la aplicación de los mismos para la generación de energía eléctrica, sin embargo, sugiere utilizar impresión 3D para la creación de materiales piezoeléctricos altamente eficientes.

Sezer and Koç (2020), en su artículo de investigación orientado a la generación de energía, buscó recopilar información específica acerca del funcionamiento y utilidad de los sensores piezoeléctricos, utilizando un muestro no probabilístico. Para el estudio, se utilizó una ficha de registro y se plasmó como dimensiones la estructura del sensor piezoeléctrico y la producción de energía. En la investigación se determinó que los sensores piezoeléctricos tienen un comportamiento mecánico similar a un sistema resorte – masa y disponen de múltiples utilidades entre las cuales se destaca

el uso médico, producción de energía, aplicaciones biomédicas y electrónicas. Concluyendo que a pesar de que existen sensores piezoeléctricos fabricados con materiales inorgánicos, orgánicos y compuestos, la versatilidad de cada uno es lo más importante al momento de emplearlos para los fines que sean necesarios, resaltando que los sensores piezoeléctricos son eficazmente utilizados como implantes biomédicos, para el monitoreo de la salud y actualmente se están empleando para la simulación de redes neuronales de un cerebro humano.

Se define la piezoelectricidad como una interacción lineal entre un sistema mecánico y eléctrico en estructuras cristalinas no simétricas o similares (Tichý, Erhart, Kittinger & Prívratká, 2010).

El efecto piezoeléctrico es básicamente un cambio proporcional de la polarización eléctrica a una determinada presión mecánica. Por lo tanto, se dice que un material es piezoeléctrico sí la aplicación de una tensión mecánica externa genera un desplazamiento dieléctrico en el material. Dicho desplazamiento manifiesta internamente una polarización eléctrica (diferencia de potencial). Sin embargo, se recalcar que la magnitud del efecto piezoeléctrico está en función de la simetría en el cristal. Entonces, un cristal con una simetría lo suficientemente baja produce una polarización eléctrica o voltaje eléctrico, utilizando la influencia de una fuerza mecánica externa. No obstante, un cristal con simetría central es incapaces de producir el efecto piezoeléctrico. (Tichý, Erhart, Kittinger & Prívratká, 2010).

La mejor manera de ilustrar el proceso del efecto piezoeléctrico es con una placa de cuarzo. Donde, una fuerza F actúa y deforma la placa de cuarzo, produciendo a través del efecto piezoeléctrico la polarización eléctrica del material P (Gautschi, 2002).

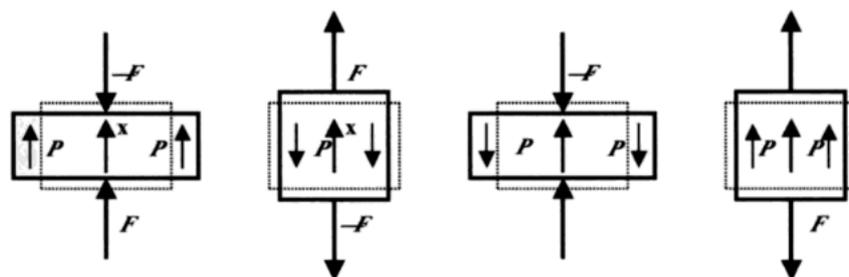


Figura 1. Ilustración del efecto piezoeléctrico en una placa de cuarzo. Tomado de Gustav Gautschi, 2002.

Todos los sensores piezoeléctricos disponen de un diseño similar, el elemento de transducción usualmente actúa como elemento sensible. Los componentes más comunes que usan materiales piezoeléctricos son la turmalina, ortofosfato de galio, niobato de litio, tantalato de litio, sulfato de litio y cerámicas piezoeléctricas. (Gautschi, 2002).

Existen cuatro tipos de efectos piezoeléctricos, el efecto longitudinal, el efecto cortante, el efecto transverso y el efecto hidrostático. Los elementos piezoeléctricos que explotan el efecto longitudinal o cortante usualmente tienen una geometría circular, de anillo o cuadrada. Sin embargo, todos los elementos piezoeléctricos reciben la fuerza externa de manera longitudinal, pero también en la mayoría de ellos, reciben la fuerza en el eje cortante. Por lo tanto, una de las caras recibiría la fuerza externa aplicada, mientras que la cara opuesta genera carga eléctrica en sincronía con la fuerza. (Gautschi, 2002).

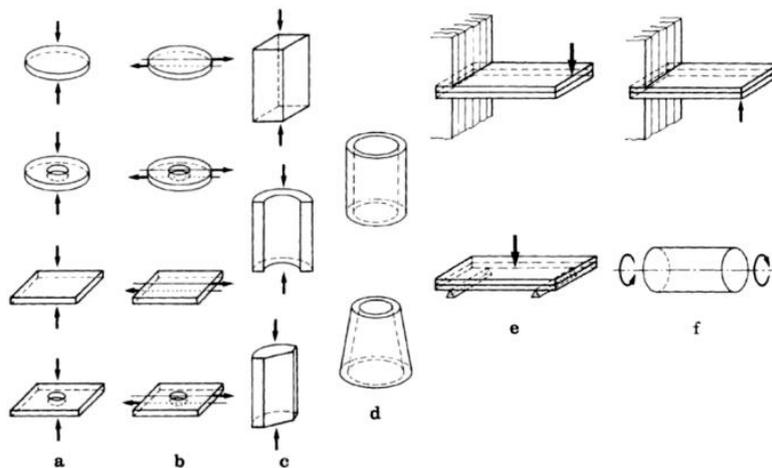


Figura 2. Elementos de transducción piezoeléctricos. Tomado de Gustav Gautschi, 2002.

Donde, en la figura previa se muestran los tipos de elementos de transducción piezoeléctricos.

- Elemento de geometría plana para efectos longitudinales.
- Elemento de geometría plana para efectos cortantes.
- Elementos de geometría tipo barra para efectos transversales.
- Elementos de geometría tipo cilindro o cono para efectos longitudinales o cortantes.

- e. Elementos dobles para efectos transversales.
- f. Elementos de torsión para efectos cortantes.

En la Tabla 1, se puede observar los diferentes tipos de materiales piezoeléctricos, más usados a nivel industrial.

Tabla 1. Clasificación de los materiales piezoeléctricos más populares

Tipo de material	Ejemplos	Constante piezoeléctrica	Utilización
Cristales singulares no ferromagnéticos	Quarzo o Turmalina	2.30 pm/V	Precisión en el control de frecuencias
Cristales singulares ferromagnéticos	Niobato de Litio (LiNbO ₃)	20 pm/V	Señales pasivas inalámbricas en telecomunicaciones
Cerámicas ferroeléctricas	Titano de circonato de plomo (PZT) o titanato de bario (BaTiO ₃)	100 a 1000 pm/V	Instrumentos para la medición de vibración
Polímeros piezoeléctricos	Fluoruro de polivinilideno (PVDF)	20 pm/V	Sensores para la detección de presión o masa

Fuente: Heywang et al., 2008.

Para estimar la factibilidad del proyecto, se puede utilizar la ecuación del retorno de la inversión del proyecto, como se visualiza a continuación.

$$R = \frac{C_c}{(E)(P_e)} \quad (1.4)$$

Donde:

C_c es el costo total invertido

E es la energía ofertada

P_e es el precio de la energía

II. METODOLOGÍA

La naturaleza de esta investigación es aplicada, ya que intenta resolver problemas en la eficiencia en lo que concierne a la tecnología piezoeléctrica, utilizando y aplicando los conocimientos adquiridos. De enfoque cuantitativo a medida que se formulan las hipótesis, se recopilan datos para así ser analizados. (Cegarra, 2004).

El enfoque de la investigación fue cuantitativo, debido a que las variables de estudios de midieron de forma numérica, así como también, los resultados fueron mostrados mediante ecuaciones y gráficas (Sampieri et al., 2017).

La investigación dispondrá de un diseño experimental, debido a que se pretende estudiar la causa – efecto de las variables que se manipulan. Además, debido a que habrá ausencia de grupo de control, se catalogaría como una investigación pre – experimental. (Sampieri et al., 2017). Donde la variable independiente sería la que se someta a experimentos para lograr estudiar la reacción de la variable dependiente.

La variable independiente de la investigación fue “prototipo piezoeléctrico”, definido como tipos de materiales sólidos como la cerámica o el cristal que son capaces de generar energía en respuesta al calor latente o estrés mecánico, simbolizando un método de conversión versátil, aplicado en diversas industrias (Hyeonsu Han, 2021).

En contraste, la variable dependiente “generación de energía eléctrica, fue definida como un método de producción eléctrica que utiliza una fuerza variable en el tiempo, generando una diferencia de potencial. Donde, la optimización del proceso depende del tipo de sistema que podría favorecer la conversión de energía (Rodríguez y Ochoa).

La población de del estudio, definida como el universo de interés que guarda relación con el estudio, debido a ciertas características inherentes (Sampieri et al., 2017). Para el presente estudio, la población fueron los múltiples diseños de prototipos piezoeléctricos encontrados en diversas investigaciones.

La muestra, definida como la cantidad de elementos que parcialmente conforman la población, pero que es representativa de la misma (Sampieri et al., 2017). Para el presente estudio, fue el diseño del prototipo piezoeléctrico seleccionado en la presente investigación.

El muestreo del estudio fue intencional u opinático, donde el investigador utiliza su juicio y conocimiento para seleccionar a los participantes o elementos que pueden proporcionar la información más valiosa para el objetivo de la investigación. (Cabezas, Naranjo y Santamaria, 2018).

La técnica seleccionada fue la observación directa, la cual implica la recopilación de datos a través de la observación sistemática de eventos o fenómenos en su entorno natural, sin intervención artificial. Este método es esencial cuando el investigador busca interactuar personalmente con el objeto de estudio. (Cabezas, Naranjo y Santamaria, 2018). Esta técnica se acopla idealmente a la estructura de la investigación, debido a que comúnmente se utiliza para estudiar comportamientos, interacciones sociales y otros fenómenos difíciles de capturar con métodos como encuestas o entrevistas.

El instrumento seleccionado será la guía de observación de campo, el cual es un documento que proporciona una estructura y un conjunto de pautas para llevar a cabo la observación directa durante una investigación. Es una herramienta diseñada para dirigir al observador y garantizar que se recopilen datos de manera sistemática y consistente. Esta guía ayuda a enfocar la atención del observador en los aspectos específicos del fenómeno o situación que se está estudiando. (Baena Paz, 2017).

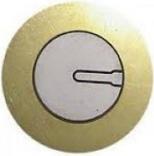
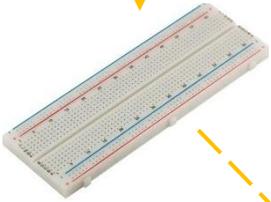
El método de análisis fue la estadística de tipo inferencial, fue la estadística inferencial, utilizada principalmente para probar las hipótesis de la investigación y estimar ciertos parámetros estadísticos de interés (Hernández et al., 2017).

Según los aspectos éticos de la Universidad César Vallejo, se resalta que la presente investigación está libre de cualquier conflicto de interés, así como también, respeta los índices de similitud permisibles resultantes por el programa Turnitin, asegurando la originalidad del estudio.

III. RESULTADOS

Para el primer objetivo, se logró el dimensionamiento de las alternativas de diseño en los componentes del prototipo, partiendo desde la creación de la matriz morfológica.

Tabla 2. Matriz morfológica para el diseño del prototipo

Función	Alternativas		
	1	2	3
Material piezoeléctrico	Cerámico 	Cristales ferromagnéticos 	Polímeros 
Tipo de conexión	Protoboard 	Arduino 	X
Material aislante base	Vidrio 	Madera 	Plástico 
Cantidad	< 10 	< 25 	< 50 
Cableado	Cobre 	Aluminio 	X

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2, se puede observar las tres posibles configuraciones para el diseño del prototipo. Donde, la línea amarilla simboliza la primera propuesta, sucesivamente, la línea roja representa la segunda propuesta y, por último, la línea azul como otra opción para los componentes que conforman el prototipo.

Como se puede visualizar en la Tabla 3, se considera un rango de puntuación, para la evaluación del diseño más idóneo que conformará el prototipo.

Tabla 3. *Tabla de puntuación para la matriz morfológica*

Puntuación	Grado de Satisfacción
5	Ideal
4	Bueno
3	Regular
2	Deficiente
1	Mediocre

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4, se observa la matriz de selección ponderada, para determinar cuál alternativa de diseño es la más factible, según la Tabla 3 de puntuación. Donde, la alternativa ganadora fue la primera propuesta en la Tabla 2.

Tabla 4. *Matriz de selección ponderada para el prototipo*

Prototipo	Importancia (%)	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada	Puntuación	Puntuación ponderada
Sencillez del Diseño	15	5	0.75	2	0.30	4	0.60
Costo Económico	30	5	1.50	2	0.60	3	0.90
Disponibilidad	35	5	1.75	4	1.40	5	1.75
Innovación	20	1	0.20	5	1.00	4	0.80
Total	100		4.20		3.30		4.05

Fuente: Elaboración propia

Para el segundo objetivo, se realizó la ejecución del modelamiento del diseño seleccionado y simulación mediante un programa CAD, donde previamente, se planteó el bosquejo del módulo piezoeléctrico.

En la Figura 3, se muestra el plano de la base de soporte del módulo, donde la estructura está compuesta por ángulos de acero al carbono de 4.50 pulgadas de espesor.

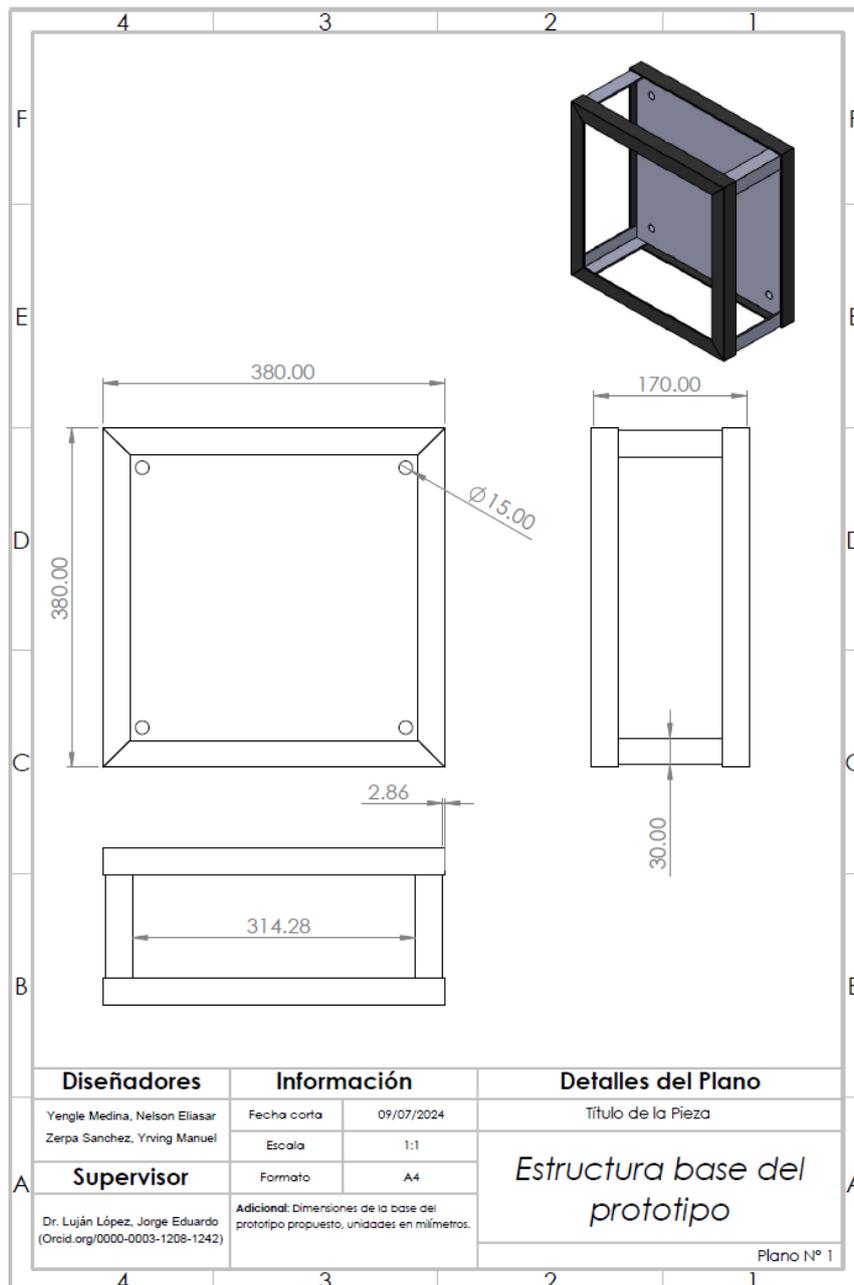


Figura 3. Modelamiento de la estructura base en SolidWorks, usando unidades

internacionales (SI).

En la Figura 4, se puede visualizar el plano de acople a la base del prototipo, compuesta parcialmente por ángulos de acero al carbono de 4.50 pulgadas, sosteniendo una pieza de madera que sirve como aislante eléctrico.

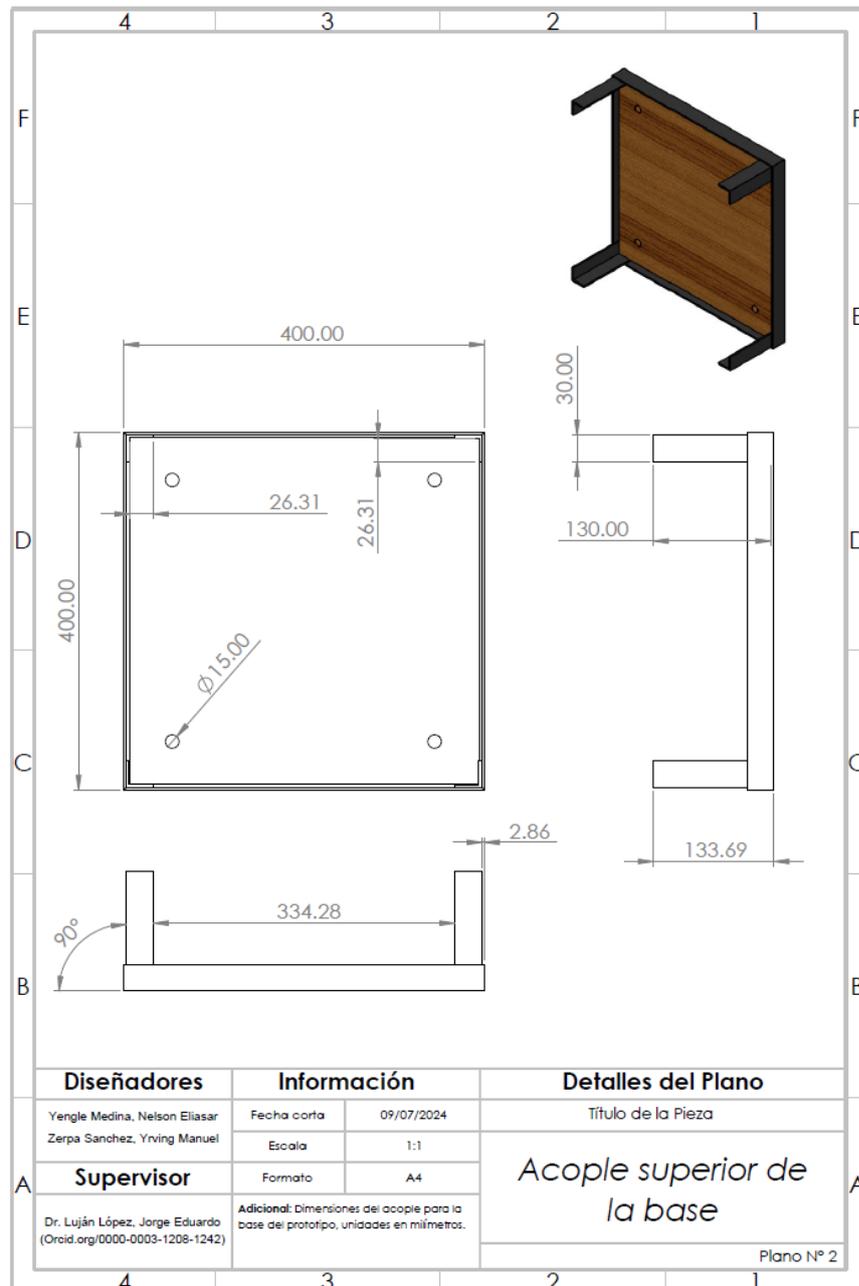


Figura 4. Modelamiento del acople de la base del módulo piezoeléctrico, realizado en SolidWorks con unidades internacionales (SI).

En la Figura 5 y Figura 6, se puede observar el módulo piezoeléctrico ya ensamblado, compuesto por las piezas que se visualizan en el Figura 3 y la Figura 4.



Figura 5. Módulo piezoeléctrico dimensionado, ensamblado y remasterizado en SolidWorks.



Figura 6. Vista explosión isométrica del módulo piezoeléctrico dimensionado en SolidWorks.

A continuación, se puede observar la simulación de esfuerzos (FEA), bajo una carga distribuida de 70 kg, donde se puede visualizar en la Figura 7 qué, la estructura sufre una deformación de 0.09 milímetros.

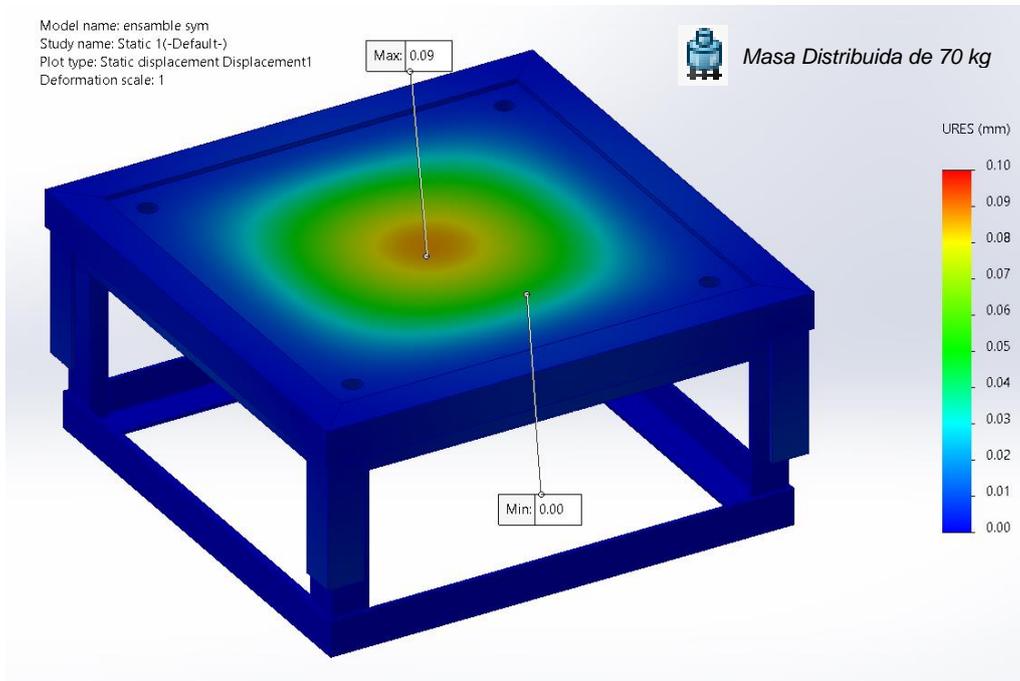


Figura 7. Simulación de desplazamiento en SolidWorks Simulation.

En la Figura 8, se puede visualizar que el esfuerzo de Von Mises máximo fue cercano a los 6.51 Mega Pascales.

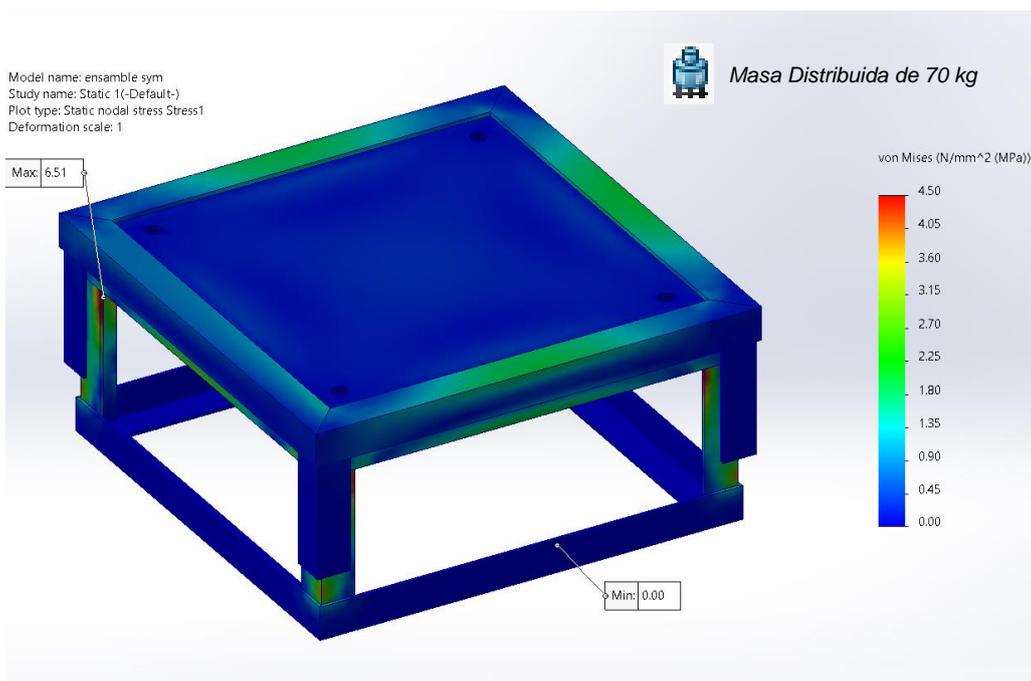


Figura 8. Simulación de esfuerzos de Von Mises en SolidWorks Simulation.

En la Figura 9, se puede visualizar que la relación entre el esfuerzo máximo entre el esfuerzo resultante (Factor de Seguridad) resulta en 44.21 unidades. Por lo tanto, se considera que la estructura soporta hasta 44 veces el esfuerzo máximo resultante de la Figura 7.

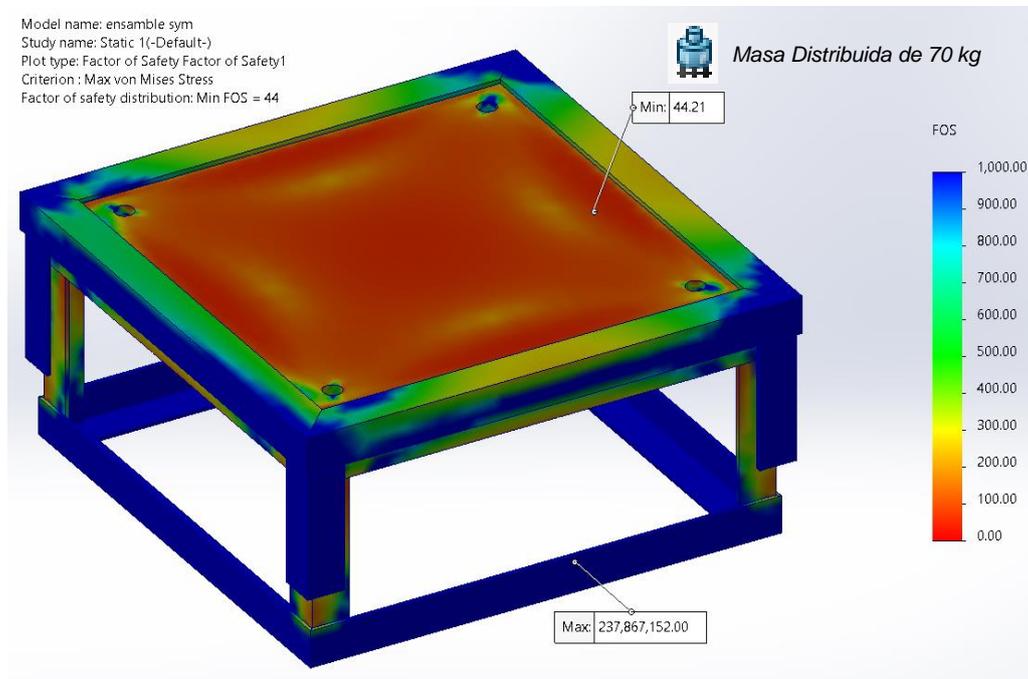


Figura 9. Simulación de esfuerzos de Von Mises en SolidWorks Simulation.

Para el tercer objetivo, se realizó la evaluación de la generación eléctrica del prototipo, usando diferentes conexiones.



Figura 10. Conexión en serie de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área de 20x20 centímetros.

Tabla 5. Resultados de los piezoeléctricos en serie 20x20 de 2.50 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	20.00	3.35	20x20 cm (Tamaño de 2.5 cm)
2	19.82	2.91	
3	13.51	3.01	
4	14.15	4.02	
5	13.95	3.15	
6	19.01	3.48	
7	15.73	2.45	
8	16.06	3.77	
9	12.97	3.14	
10	10.36	3.11	
11	20.00	3.04	
12	17.20	2.98	
13	13.96	3.48	
14	13.43	2.74	
15	10.49	3.28	
16	18.04	3.49	
17	11.02	3.05	
18	10.78	2.48	
19	13.03	3.57	
20	16.15	3.24	
Voltaje promedio	14.983	3.1485	

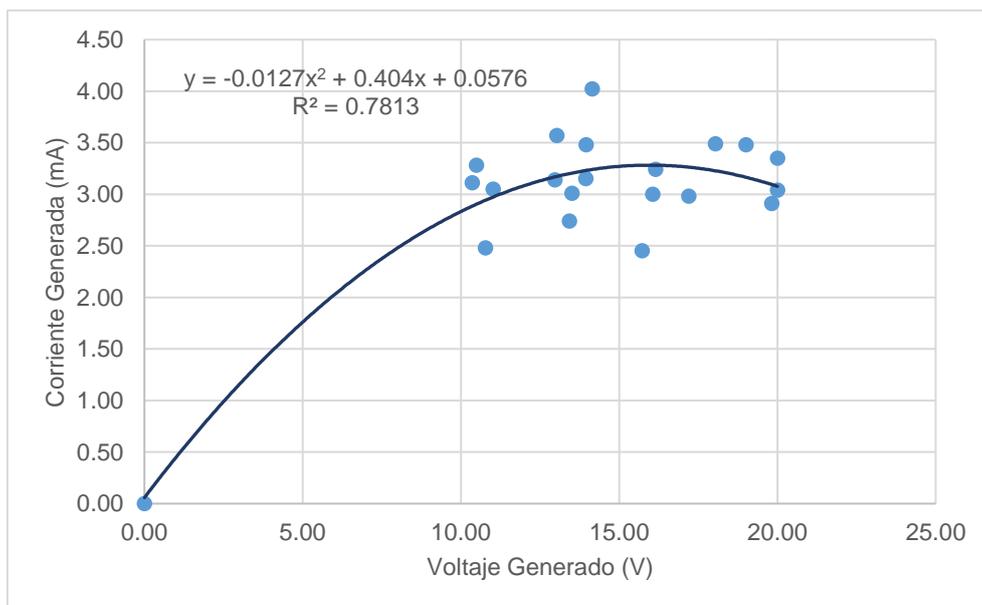


Figura 11. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en serie.

Tabla 6. Resultados de los piezoeléctricos en serie 20x20 de 4 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	5.97	1.78	
2	10.02	1.47	
3	10.42	1.99	
4	8.86	2.41	
5	8.33	1.04	
6	9.11	1.93	
7	9.77	1.97	
8	10.46	0.99	
9	10.80	2.00	20x20 cm
10	9.41	2.07	
11	8.60	0.92	(Tamaño de 4 cm)
12	9.66	1.97	
13	8.87	1.64	
14	10.24	0.54	
15	9.82	0.87	
16	8.48	1.67	
17	7.25	0.79	
18	8.94	2.47	
19	10.10	2.77	
20	8.70	0.95	
Voltaje promedio	9.1905	1.612	

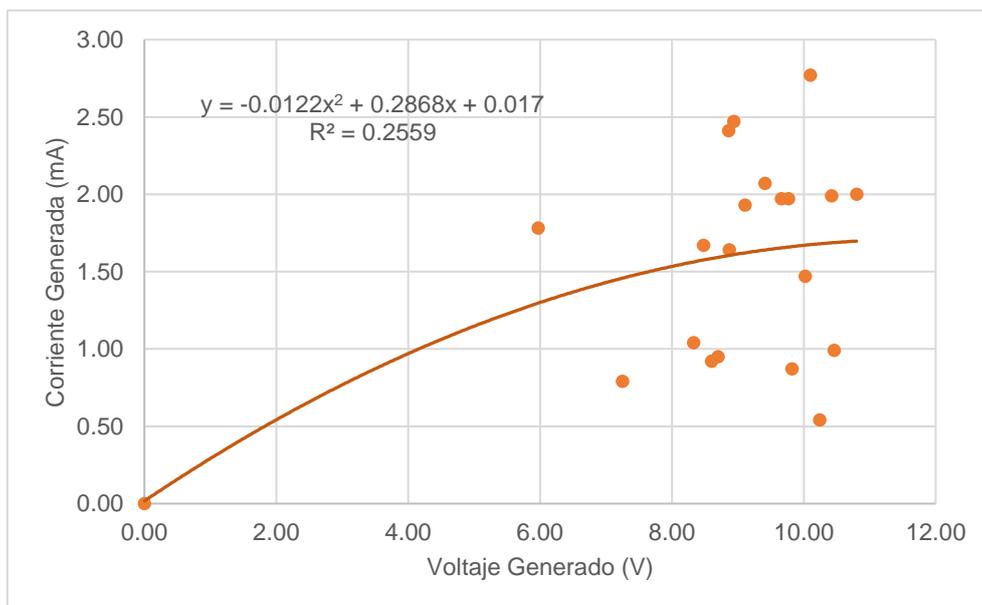


Figura 12. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en serie.



Figura 13. Conexión en serie de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área de 25x25 centímetros.

Tabla 7. Resultados de los piezoeléctricos en serie 25x25 de 2.50 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	13.30	2.10	25x25 cm (Tamaño de 2.5 cm)
2	16.18	2.05	
3	18.68	1.78	
4	14.78	1.45	
5	12.46	1.97	
6	10.49	2.94	
7	10.50	1.27	
8	14.20	2.15	
9	13.81	2.45	
10	13.77	1.64	
11	13.88	1.83	
12	10.61	3.01	
13	9.10	1.94	
14	11.76	1.97	
15	15.28	2.31	
16	12.70	2.91	
17	9.14	1.93	
18	11.16	1.82	
19	14.53	1.39	
20	13.32	1.75	
Voltaje promedio	12.9825	2.033	

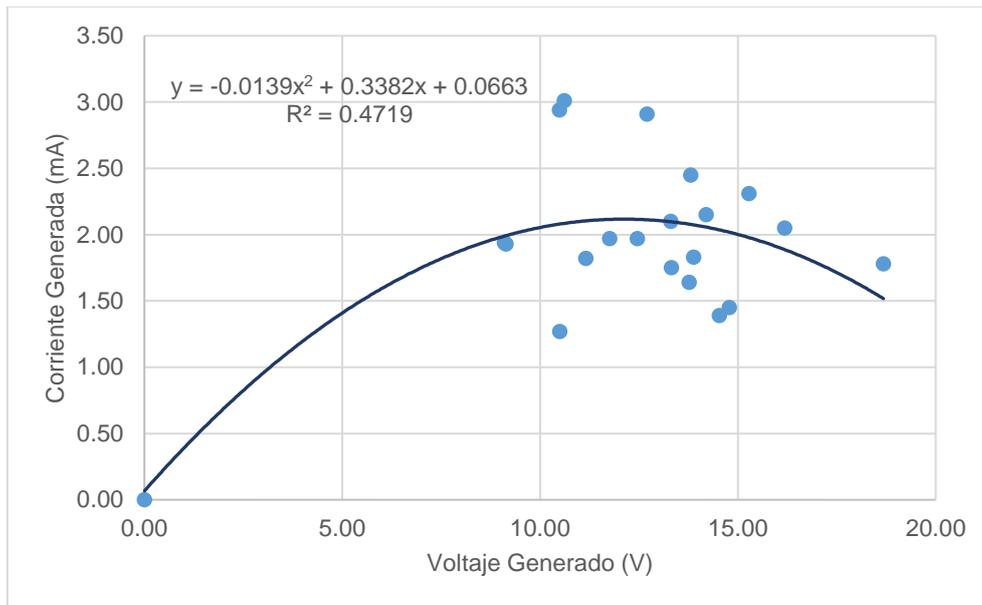


Figura 14. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 2.5 cm en serie.

Tabla 8. Resultados de los piezoeléctricos en serie 25x25 de 4 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	9.89	2.07	
2	15.40	1.97	
3	12.15	1.97	
4	11.89	1.67	
5	11.61	1.99	
6	11.51	2.97	
7	10.39	0.99	
8	12.54	2.97	
9	10.60	2.05	
10	11.74	3.07	25x25 cm
11	15.20	2.91	(Tamaño de 4 cm)
12	10.44	2.90	
13	10.19	1.97	
14	15.73	2.04	
15	15.88	2.48	
16	14.14	2.99	
17	10.47	2.92	
18	11.81	3.07	
19	10.35	3.11	
20	12.16	3.97	
Voltaje promedio	12.2045	2.504	

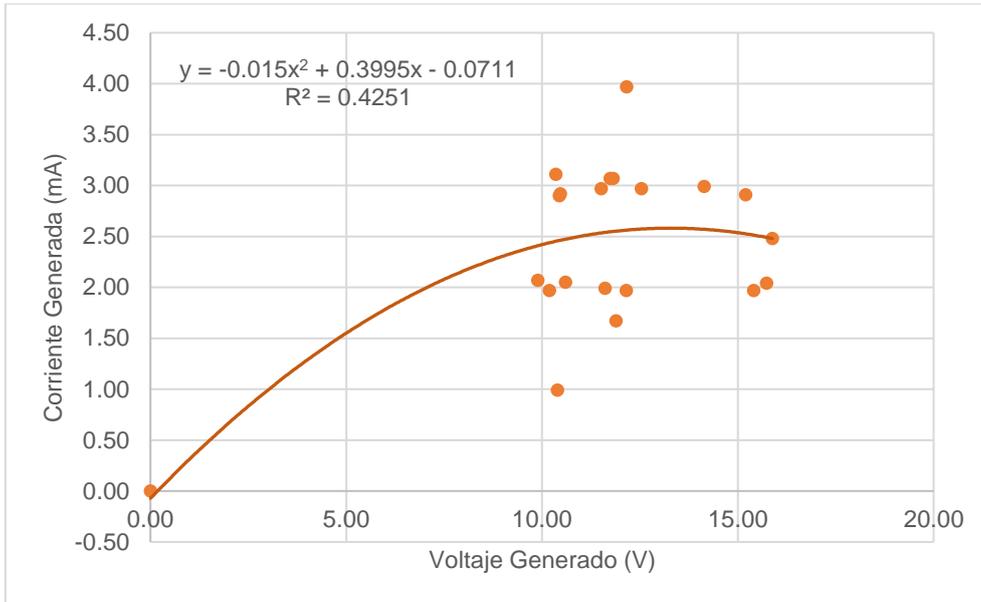


Figura 15. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 4 cm en serie.

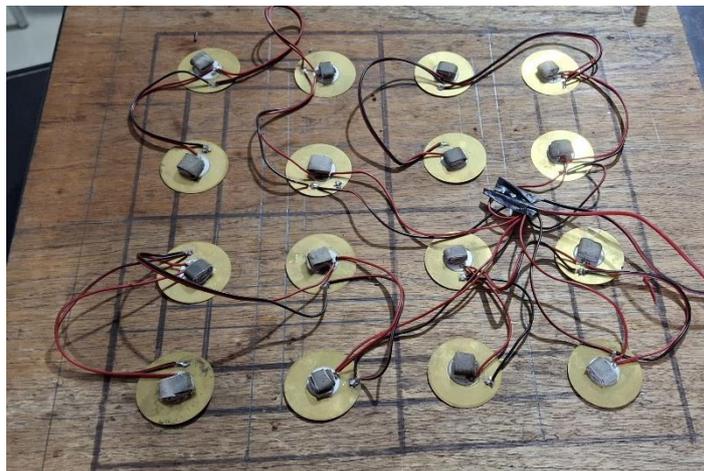


Figura 16. Conexión en serie de 16 piezas piezoeléctricos, formando un área de 30x30 centímetros.

Tabla 9. Resultados de los piezoelectricos en serie 30x30 de 2.50 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	10.53	1.97	30x30 cm (Tamaño de 2.5 cm)
2	13.01	1.45	
3	7.93	1.74	
4	9.80	2.01	
5	9.44	1.23	
6	12.33	1.73	
7	8.53	1.24	
8	9.38	0.93	
9	9.12	1.89	
10	11.41	2.05	
11	11.41	0.79	
12	7.93	1.84	
13	10.53	1.98	
14	12.14	0.59	
15	9.55	0.41	
16	10.55	1.56	
17	8.86	0.73	
18	7.85	2.15	
19	8.71	2.17	
20	7.59	0.98	
Voltaje promedio	9.83	1.472	

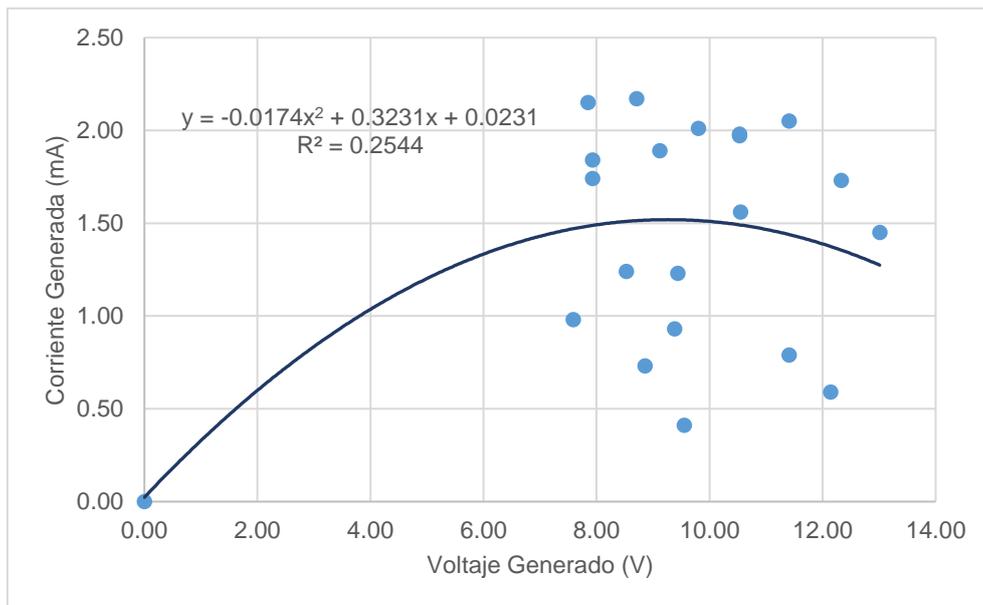


Figura 17. Relación resultante para el módulo piezoelectrico 25x25 de 2.5 cm en serie.

Tabla 10. Resultados de los piezoeléctricos en serie 30x30 de 4 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	12.79	4.04	30x30 cm (Tamaño de 4 cm)
2	13.84	3.91	
3	16.80	3.67	
4	14.20	3.79	
5	13.85	3.99	
6	12.87	3.75	
7	13.32	3.86	
8	15.73	3.47	
9	12.77	3.80	
10	14.22	4.01	
11	13.73	3.64	
12	12.36	4.09	
13	13.34	3.84	
14	13.73	3.70	
15	15.69	3.97	
16	14.01	3.74	
17	12.96	3.61	
18	14.58	4.07	
19	15.40	4.12	
20	16.30	3.90	
Voltaje promedio	14.1245	3.8485	

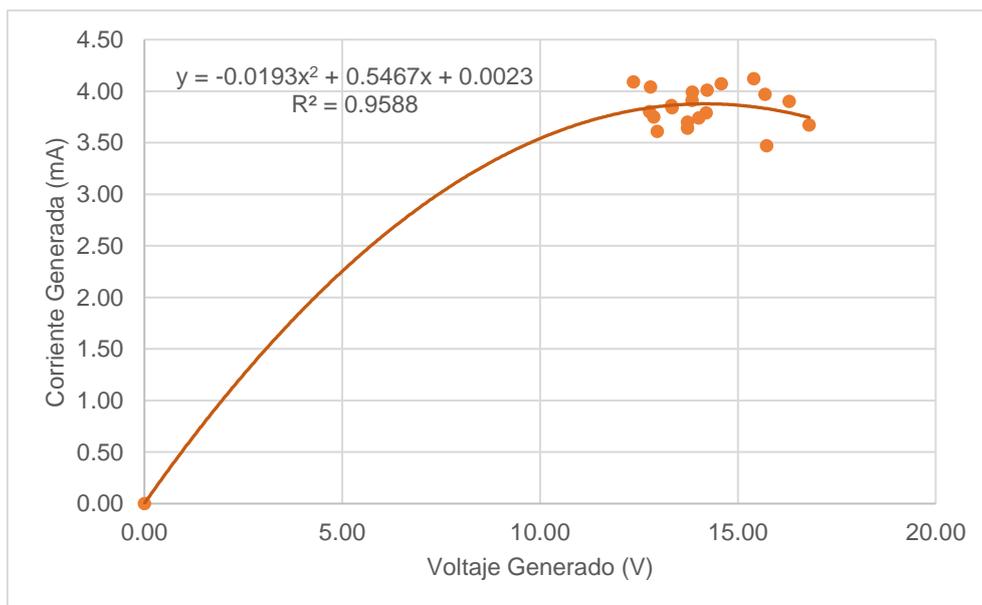


Figura 18. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 30x30 de 4 cm en serie.

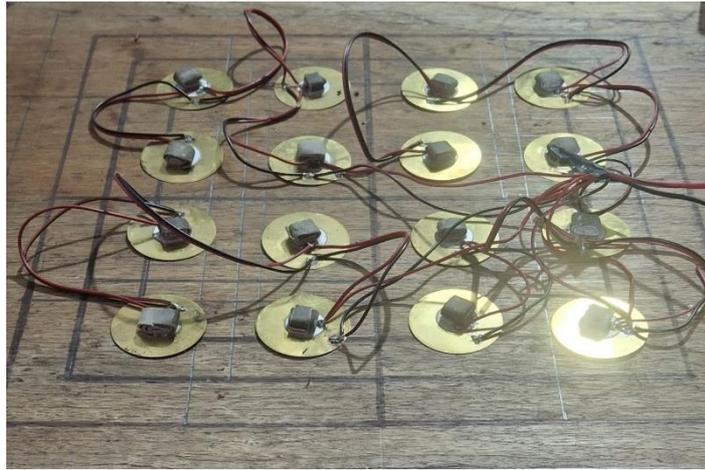


Figura 19. Conexión en paralelo de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área 20x20 centímetros.

Tabla 11. Resultados de los piezoeléctricos en paralelo 20x20 de 2.50 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	14.78	9.72	20x20 cm (Tamaño de 2.5 cm)
2	17.01	7.08	
3	15.40	10.79	
4	13.77	9.70	
5	15.65	11.00	
6	16.40	9.00	
7	16.40	9.66	
8	16.77	10.57	
9	16.80	8.05	
10	13.83	8.94	
11	15.20	9.72	
12	12.73	9.34	
13	16.47	9.14	
14	18.31	10.05	
15	18.26	10.97	
16	18.87	9.73	
17	17.80	11.97	
18	16.04	8.47	
19	16.30	9.69	
20	14.82	9.08	
Voltaje promedio	16.042	9.6335	

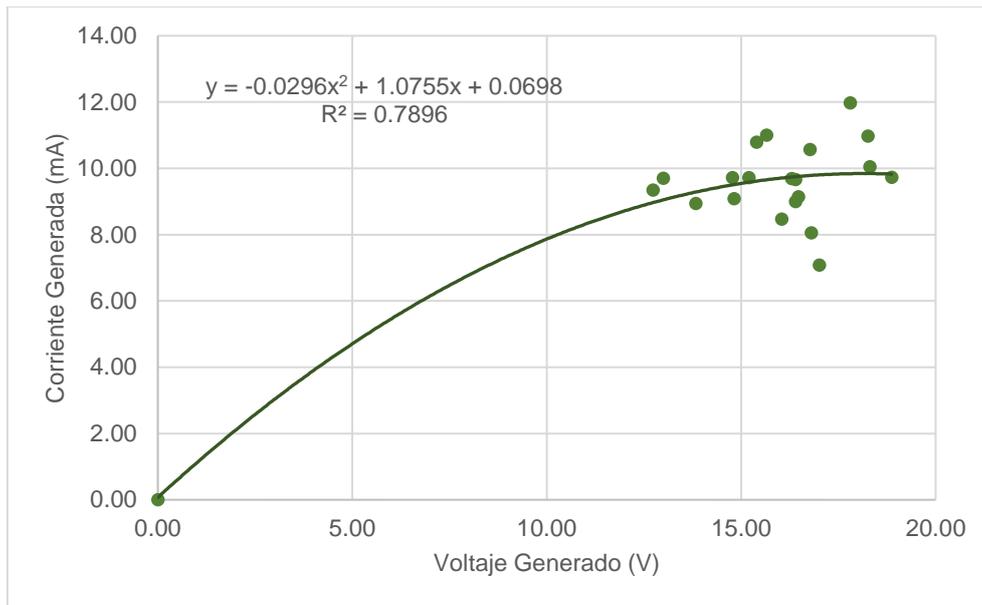


Figura 20. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en paralelo.

Tabla 12. Resultados obtenidos de los piezoeléctricos en paralelo 20x20

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	5.72	4.71	
2	6.20	6.00	
3	5.55	4.69	
4	5.85	3.70	
5	4.55	3.07	
6	6.80	6.70	
7	5.99	6.72	
8	5.28	4.82	
9	5.41	5.90	
10	5.39	5.74	20x20 cm
11	5.31	5.02	(Tamaño de 4 cm)
12	4.90	3.54	
13	5.65	5.43	
14	5.95	6.99	
15	5.70	5.97	
16	4.11	3.04	
17	5.16	3.04	
18	6.06	5.99	
19	4.74	3.77	
20	4.98	4.70	
Voltaje promedio	5.465	4.977	

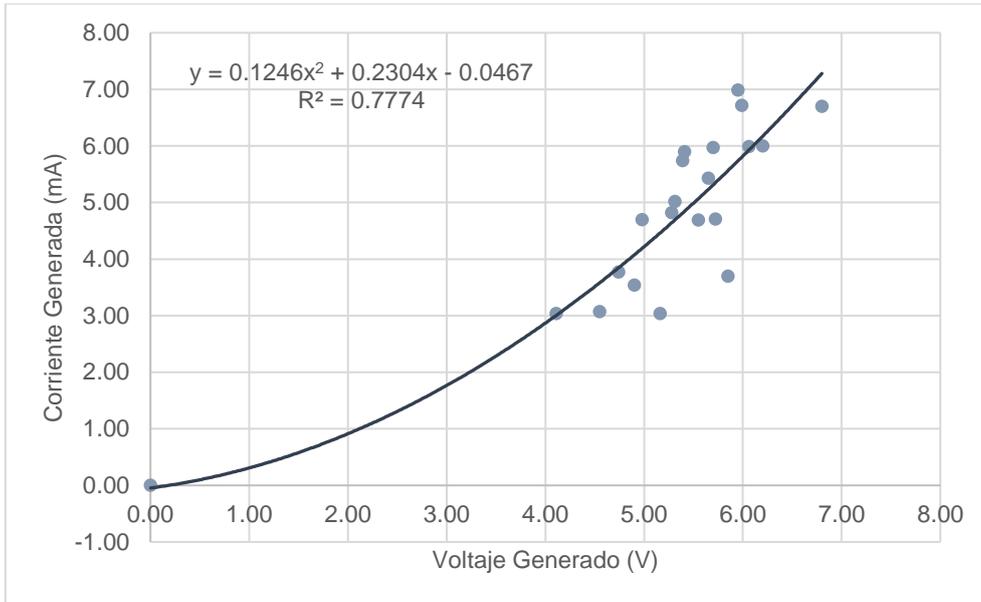


Figura 21. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en paralelo.

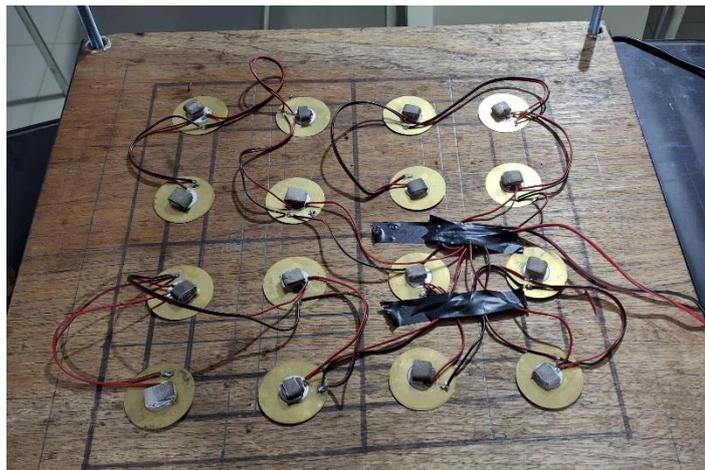


Figura 22. Conexión en paralelo de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área 25x25 centímetros.

Tabla 13. Resultados de los piezoeléctricos en paralelo 25x25 de 2.50 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	14.70	6.97	
2	9.60	6.00	
3	12.66	8.17	
4	9.70	8.67	
5	15.07	6.67	
6	12.41	7.97	
7	4.44	5.97	
8	8.30	8.94	
9	5.35	7.99	
10	12.02	8.07	25x25 cm
11	8.83	9.89	(Tamaño de 2.5 cm)
12	12.85	9.11	
13	11.68	8.61	
14	6.10	5.40	
15	10.71	6.93	
16	8.06	9.05	
17	8.92	9.75	
18	11.02	8.79	
19	9.02	7.09	
20	11.76	5.47	
Voltaje promedio	10.16	7.7755	

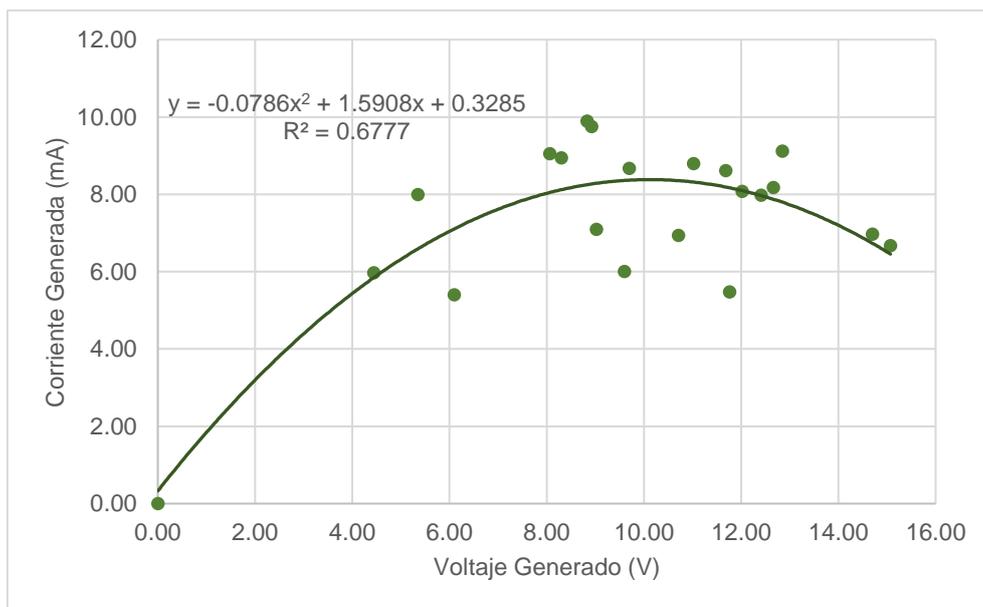


Figura 23. Relación resultante para el módulo 25x25 de 2.5 cm en paralelo.

Tabla 14. Resultados de los piezoeléctricos en paralelo 25x25 de 4 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	12.67	9.71	
2	10.53	7.47	
3	9.56	7.04	
4	11.29	8.09	
5	13.38	10.05	
6	12.00	6.17	
7	12.79	6.99	
8	11.50	6.14	
9	11.29	6.07	25x25 cm
10	10.65	7.89	
11	9.68	6.75	(Tamaño de 4 cm)
12	9.71	6.77	
13	13.45	8.79	
14	12.39	7.47	
15	10.82	8.49	
16	10.03	7.04	
17	10.58	7.24	
18	10.20	7.40	
19	11.14	6.79	
20	8.16	7.07	
Voltaje promedio	11.091	7.4715	

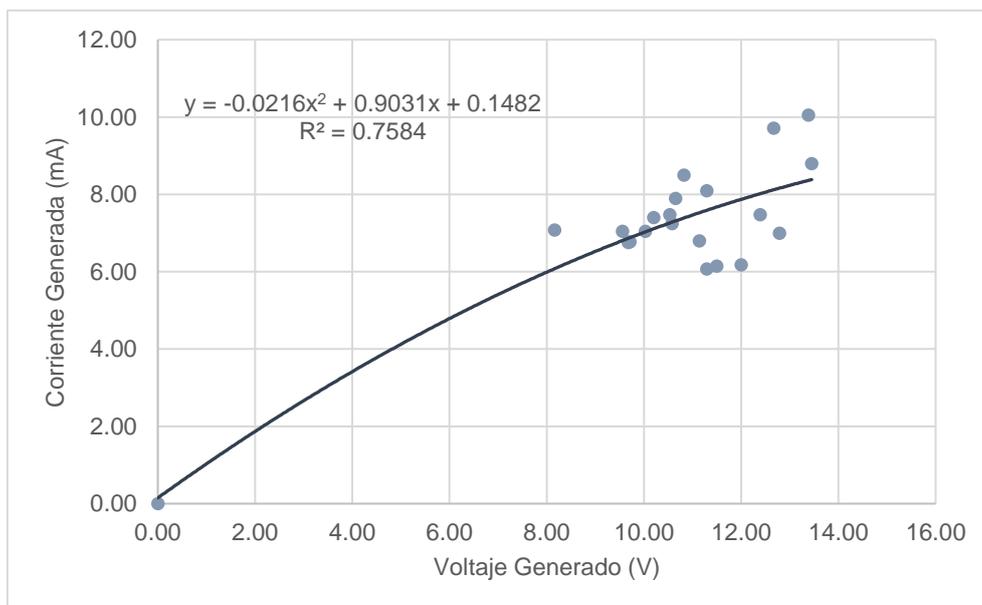


Figura 24. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 4 cm en paralelo.

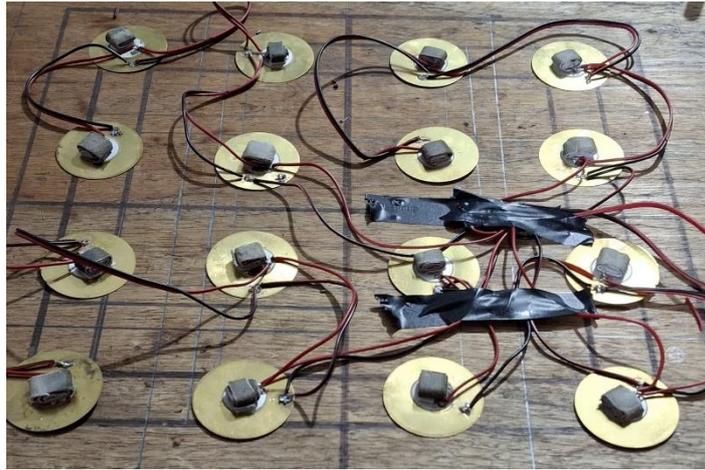


Figura 25. Conexión en paralelo de 16 piezas piezoeléctricas, formando un área 30x30 centímetros.

Tabla 15. Resultados obtenidos de los piezoeléctricos en paralelo 30x30

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	11.09	4.51	30x30 cm (Tamaño de 2.5 cm)
2	8.41	8.33	
3	8.15	3.47	
4	6.74	3.01	
5	11.20	3.77	
6	10.85	3.05	
7	9.14	4.81	
8	8.38	4.97	
9	8.06	4.80	
10	7.21	5.17	
11	12.49	6.95	
12	11.86	5.78	
13	8.74	3.78	
14	6.97	6.37	
15	11.98	5.90	
16	9.09	6.42	
17	6.15	2.90	
18	4.84	6.07	
19	10.75	6.06	
20	8.32	3.47	
Voltaje promedio	9.021	4.941	

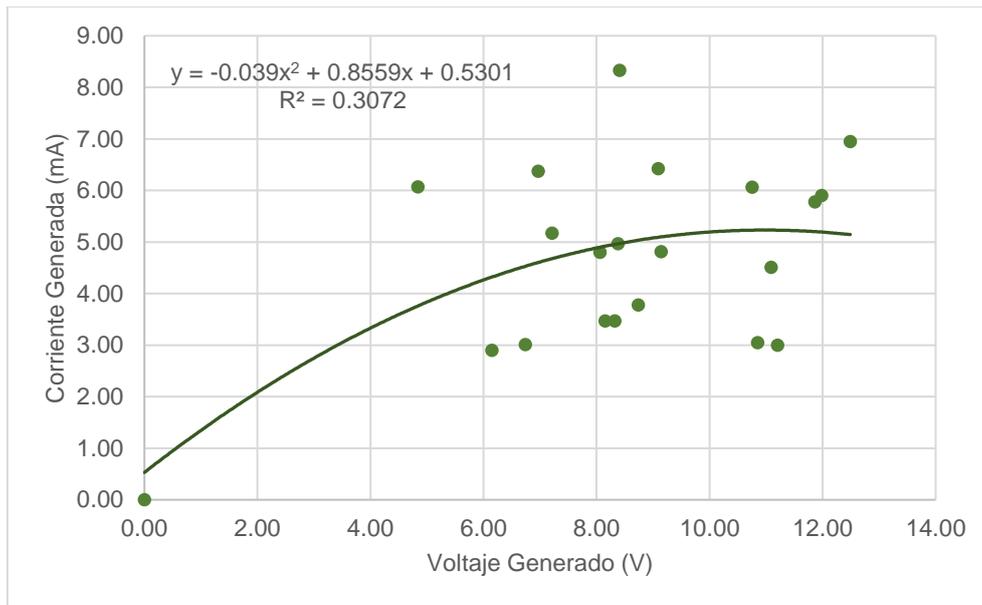


Figura 26. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 30x30 de 2.50 cm en paralelo.

Tabla 16. Resultados obtenidos de los piezoeléctricos en paralelo 30x30

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	18.58	10.74	
2	16.80	6.41	
3	16.15	11.01	
4	17.80	9.64	
5	15.40	12.07	
6	16.30	9.07	
7	13.03	9.79	
8	16.91	11.07	
9	13.83	9.87	
10	16.04	10.97	30x30 cm
11	16.06	9.88	(Tamaño de 4 cm)
12	17.41	9.71	
13	15.85	9.53	
14	16.77	10.17	
15	14.78	10.74	
16	13.73	11.09	
17	12.73	11.43	
18	14.58	9.40	
19	15.28	9.79	
20	13.77	10.90	
Voltaje promedio	15.59	10.164	

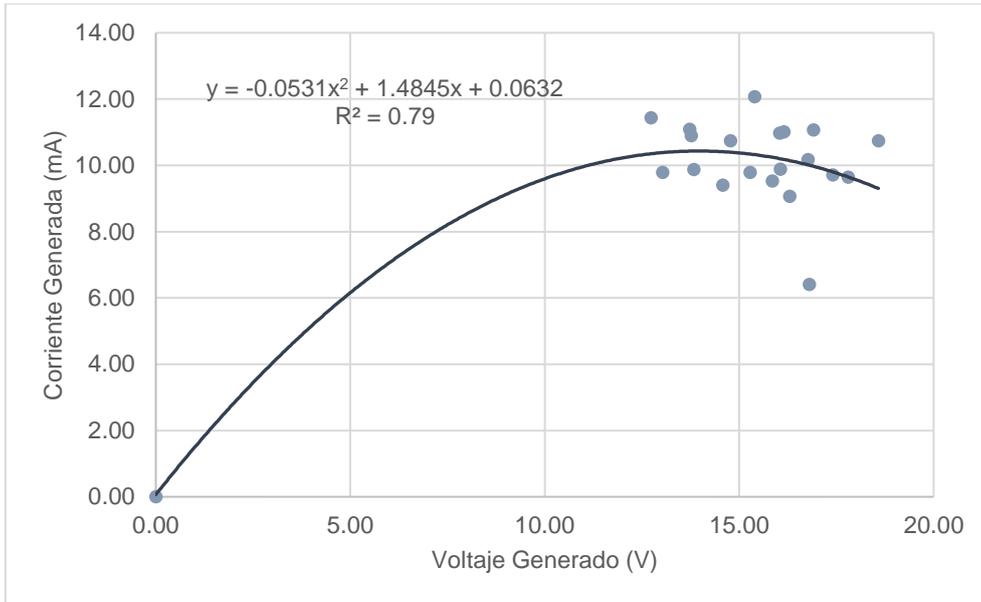


Figura 27. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 30x30 de 4 cm en paralelo.



Figura 28. Conexión mixta de 16 piezas piezoeléctricas con un juego en paralelo y tres en serie, formando un área 20x20 centímetros.

Tabla 17. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 2.5 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	17.20	11.05	
2	16.40	10.21	
3	18.31	11.00	
4	20.00	12.00	
5	18.31	11.09	
6	19.82	11.97	
7	17.01	10.07	
8	16.15	10.78	
9	18.00	11.50	20x20 cm
10	15.73	9.87	
11	18.68	9.74	(Tamaño de 2.5 cm)
12	16.30	10.66	
13	16.06	10.51	
14	16.15	11.59	
15	19.01	11.85	
16	18.87	12.07	
17	18.04	14.00	
18	19.20	11.45	
19	16.80	11.90	
20	20.00	11.87	
Voltaje promedio	17.802	11.259	

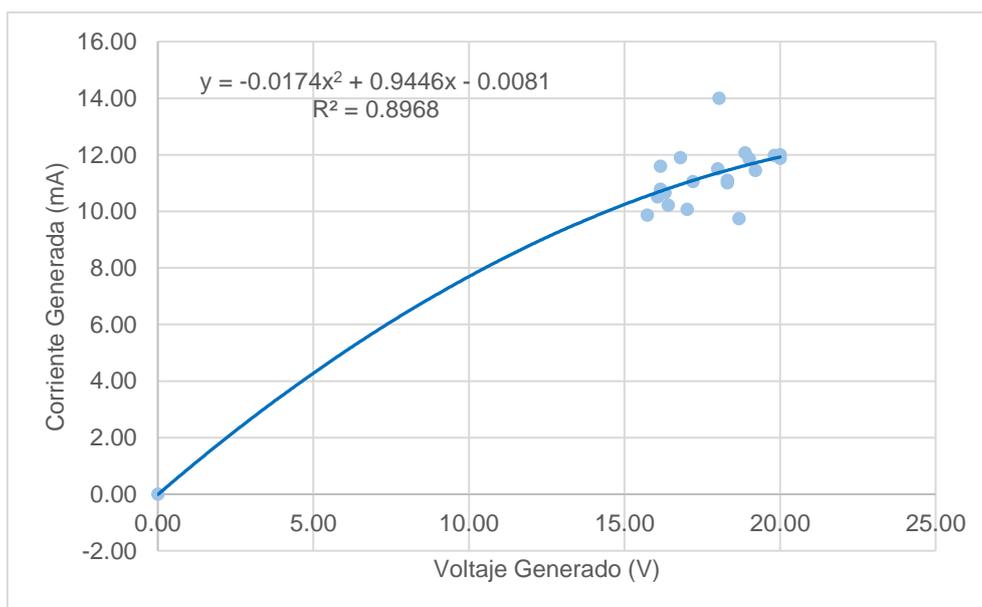


Figura 29. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en conexión mixta de un juego en paralelo y tres en serie.

Tabla 18. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 4 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	12.33	11.45	20x20 cm (Tamaño de 4 cm)
2	14.70	12.47	
3	15.32	11.05	
4	12.38	12.35	
5	13.02	11.14	
6	12.60	11.86	
7	13.68	11.07	
8	14.60	11.87	
9	13.03	11.57	
10	14.22	10.04	
11	15.08	10.97	
12	12.64	11.05	
13	14.47	10.68	
14	12.14	12.04	
15	12.60	11.99	
16	12.00	12.07	
17	12.36	14.05	
18	14.95	11.97	
19	12.89	11.58	
20	12.50	12.47	
Voltaje promedio	13.3755	11.687	

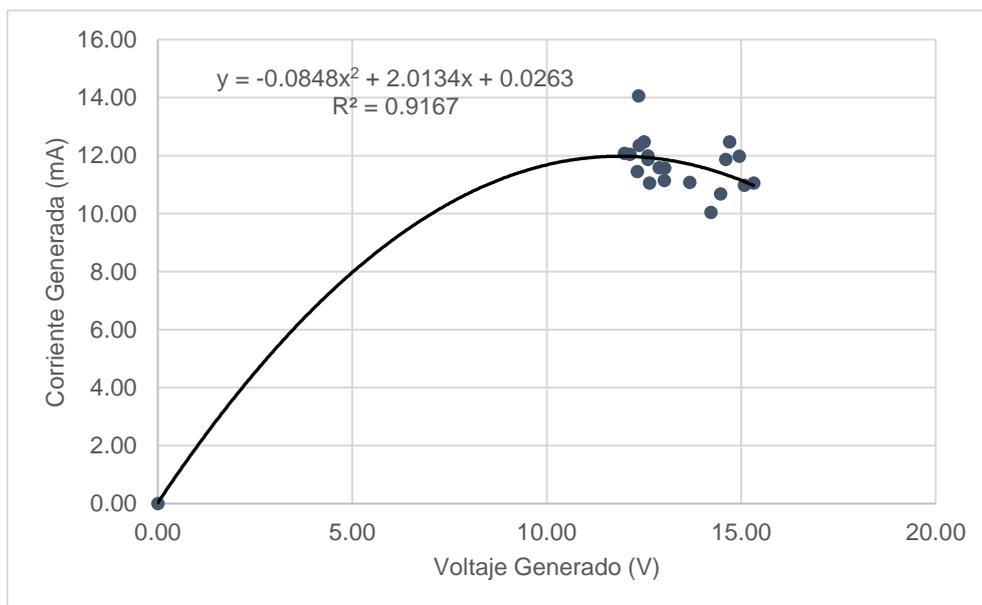


Figura 30. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en conexión mixta de un juego en paralelo y tres en serie.

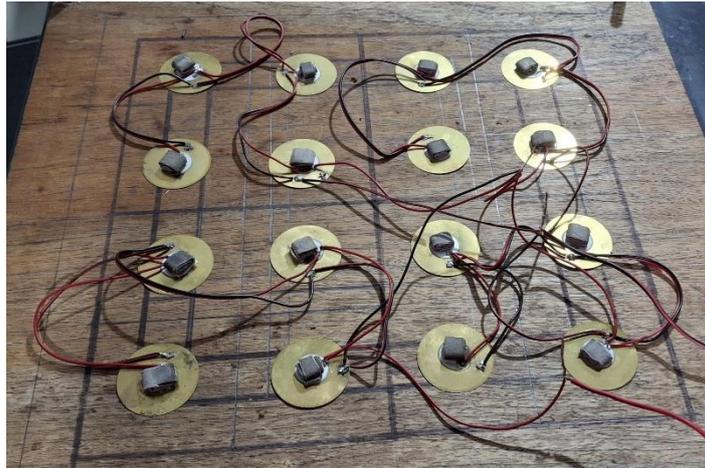


Figura 31. Conexión mixta de 16 piezas piezoeléctricas con un juego en paralelo y tres en serie, formando un área 25x25 centímetros.

Tabla 19. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 25x25 de 4 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	19.00	14.80	25x25 cm (Tamaño de 4 cm)
2	18.60	12.07	
3	14.90	11.86	
4	15.80	11.75	
5	15.57	12.97	
6	14.82	13.07	
7	14.53	13.70	
8	15.33	11.07	
9	14.43	12.97	
10	13.22	12.97	
11	13.73	13.97	
12	14.58	12.78	
13	14.16	11.97	
14	17.89	12.90	
15	14.67	11.98	
16	12.02	13.70	
17	14.10	12.99	
18	17.36	12.97	
19	14.92	13.80	
20	15.16	13.47	
Voltaje promedio	15.2395	12.888	

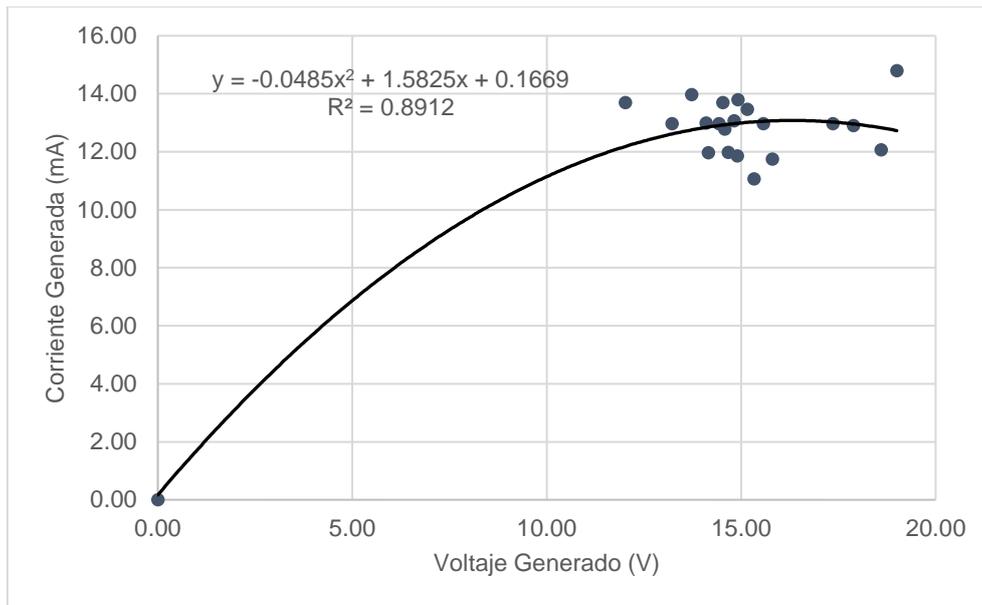


Figura 32. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 25x25 de 4 cm en conexión mixta de un juego en paralelo y tres en serie.

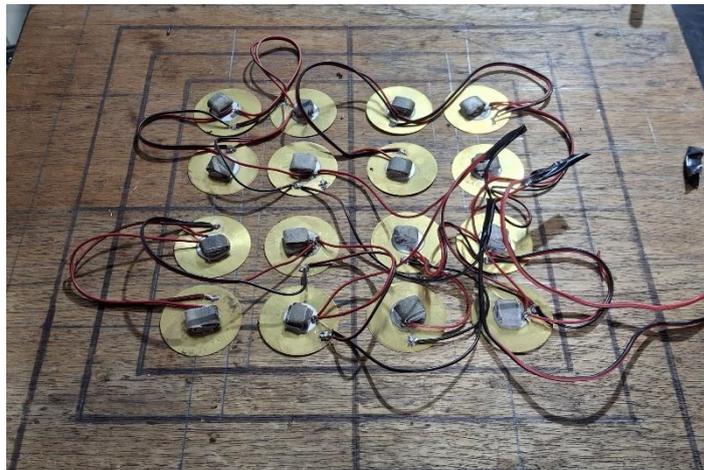


Figura 33. Conexión mixta de 16 piezas piezoeléctricas con dos juegos en paralelo y dos en serie, formando un área 25x25 centímetros.

Tabla 20. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 2.5 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	13.30	10.05	20x20 cm (Tamaño de 2.5 cm)
2	16.18	10.99	
3	18.68	11.04	
4	14.78	11.97	
5	12.46	9.99	
6	10.49	9.01	
7	10.50	7.93	
8	14.20	10.24	
9	13.81	10.40	
10	13.77	6.70	
11	13.88	9.09	
12	10.61	8.74	
13	9.10	7.98	
14	11.76	8.83	
15	15.28	9.73	
16	12.70	10.00	
17	9.14	8.04	
18	11.16	8.97	
19	14.53	9.47	
20	13.32	9.07	
Voltaje promedio	12.9825	9.412	

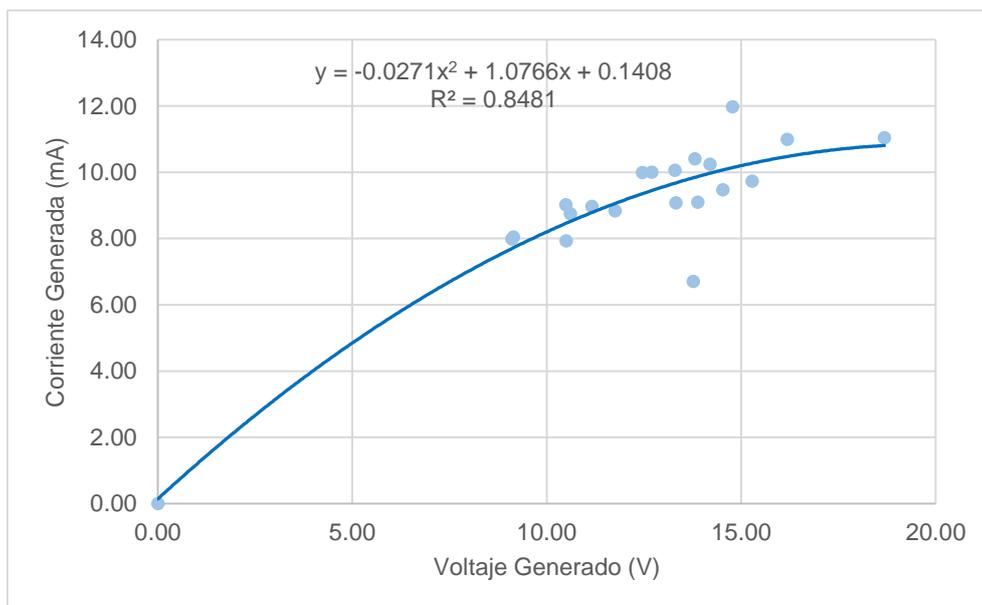


Figura 34. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 2.5 cm en conexión mixta de dos juegos en paralelo y dos en serie.

Tabla 21. Resultados de los piezoeléctricos conexión mixta 20x20 de 4 cm

Prueba	Voltaje Máximo	Miliamperios	Área
1	9.64	10.47	
2	9.53	10.88	
3	9.43	10.97	
4	9.70	10.79	
5	10.05	10.70	
6	9.80	10.92	
7	9.38	8.81	
8	9.55	11.29	
9	10.56	10.83	20x20 cm
10	10.14	7.97	
11	10.56	10.70	(Tamaño de 4 cm)
12	9.71	9.10	
13	9.54	8.67	
14	9.40	9.05	
15	10.53	9.46	
16	9.23	11.07	
17	9.04	9.00	
18	7.93	8.95	
19	9.54	9.31	
20	7.85	10.90	
Voltaje promedio	9.5555	9.99175	

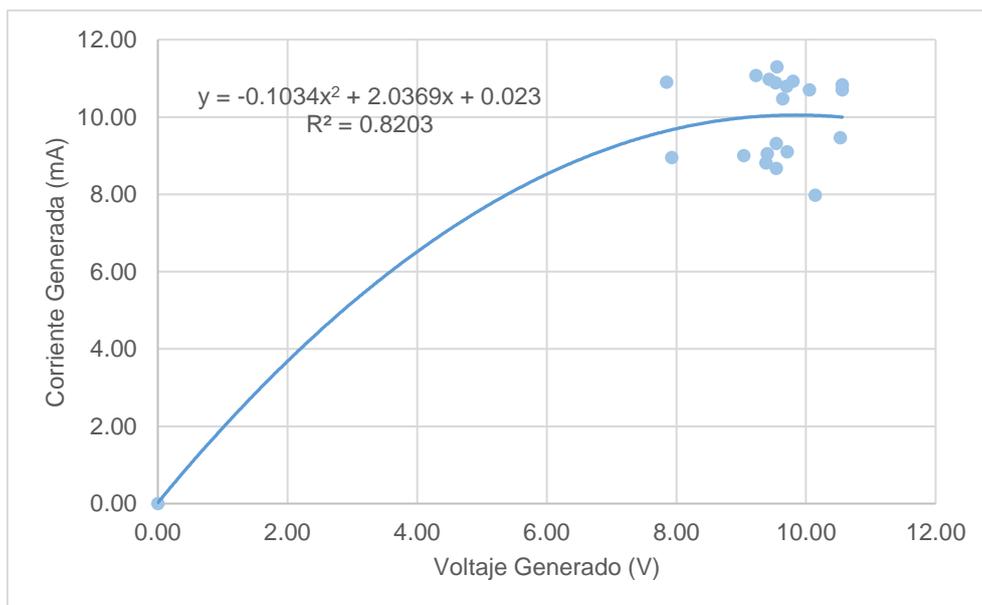


Figura 34. Relación resultante para el módulo piezoeléctrico 20x20 de 4 cm en conexión mixta de dos juegos en paralelo y dos en serie.

Para el cuarto objetivo de la investigación, se realizó el cálculo del nivel de factibilidad del proyecto, considerando la configuración eléctrica con la mayor uniformidad, siendo este caso la gráfica de la Figura 15, ya que contiene mejor coeficiente de determinación (R^2).

Empleando la ecuación (1.3), se puede determinar la energía eléctrica generada por la configuración 30x30 de 4 cm en serie.

$$P = 14.1245 V \times \frac{3.8485}{1000} A \approx 0.0686 \text{ Watts (C.C)}$$

Teniendo en consideración el desplazamiento promedio del módulo piezoeléctrico de la Figura 6 y la fuerza ejercida sobre el mismo, se determina la energía mecánica utilizada con la ecuación (1.2), asumiendo que el tiempo de duración es 1 segundo.

$$E_{mecánica} = \frac{70 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.09 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}}{1 \text{ s}} \approx 0.0686 \text{ Watts}$$

Empleando la ecuación (1.1), se calcula la eficiencia del módulo piezoeléctrico con área de 30x30 cm y tamaño de 4 cm en serie.

$$\eta = \frac{0.0686 \text{ W}}{1.82 \text{ W}} \approx 3.77\%$$

Para determinar la factibilidad del proyecto, se plantea los costos asociados del mismo, así como se puede observar en la Tabla 22.

Tabla 22. Gastos del prototipo piezoeléctrico

Material	Costo
Madera Tornillo	S/ 55.00
Resortes	S/ 20.00
Huecos En Madera	S/ 5.00
Mano De Obra	S/ 150.00
Piezas Piezoeléctrica - 2.5 Cm	S/ 64.00
Piezas Piezoeléctrica - 4 Cm	S/ 84.00
Angulo 4.5 Mmx30 Mm X 6 M	S/ 50.00
Taxis	S/ 9.00
Protoboard	S/ 18.00
Cable	S/ 15.00
Estaño	S/ 9.00
Pistola De Soldar	S/ 25.00
Cinta Aislante	S/ 10.50
Barrila Roscada Con Tuerca Y Arandela	S/ 16.00
Cuero	S/ 25.00
Total	S/ 555.50

Considerando que el precio de la electricidad en Perú es de 0.49 Soles por kWh, entonces se estima el periodo del retorno de la inversión con la ecuación (1.4), asumiendo que el módulo opera todo el año.

$$R = \frac{555.50 \text{ Soles}}{\left(\frac{0.0686 \text{ kW}}{1000} \frac{\text{s}}{\text{s}} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}\right) \left(0.49 \frac{\text{Soles}}{\text{kWh}}\right)} \approx 7 \text{ meses}$$

IV. DISCUSIÓN

Para el primer objetivo, se utilizó la matriz morfológica para la elección del diseño en el módulo piezoeléctrico. Además, considerando las bases teóricas de Nan Wu, Binbao & Quan Wang, en su publicación del año 2021, se hace referencia a que el tipo de sensor piezoeléctrico tiene diferentes limitaciones, por ello, como se puede observar en la Tabla 4, se priorizó el costo del proyecto y la disponibilidad de los materiales para el módulo. Asimismo, recopilando la información teórica de Sezer and Koç, en su publicación del año 2020, se hace hincapié en que cada tipo de sensor tiene cierta versatilidad en base a la finalidad del mismo. Por lo tanto, el módulo tuvo la función genérica de generar electricidad en corriente continua para cualquier carga.

Para el segundo objetivo, se puede observar en la Figura 6 que, el módulo piezoeléctrico sufre una deformación máxima de 0.09 milímetros en el centro del piso. No obstante, se puede visualizar que la deformación promedio ronda los 0.06 milímetros en toda la superficie.

Para el tercer objetivo, se puede observar que, dependiendo de la conexión del módulo piezoeléctrico, la electricidad generada podría variar significativamente. Asimismo, se puede visualizar una gran dispersión entre los datos de generación de voltaje y electricidad producida. No obstante, la conexión en serie de los 16 sensores piezoeléctricos de tamaño de 4 centímetros, abarcando un área de 30x30 centímetros, muestra una mayor uniformidad en la generación de corriente en función del voltaje. Por lo tanto, se deduce que el mejor tipo de conexión fue en serie, en comparación con la conexión en paralelo o mixta de los sensores.

Para el cuarto objetivo, se pudo evidenciar que la energía producida con la conexión en serie con tamaño de 4 centímetros y 30x30 centímetros de área producen hasta 0.0686 Watts de potencia en corriente continua, con una eficiencia de aproximadamente 3.77%. Además, considerando el costo total del proyecto y la energía generada, se obtuvo un periodo de recuperación de la inversión de 7 meses calendario.

Comparando la potencia generada con los resultados de los autores Dewanjee & Shabiul, en su publicación del año 2023, donde obtuvo una potencia de 10 μ W, se deduce que el presente proyecto dispone de un mayor potencial energético para

aprovechar. Asimismo, con la teoría recopilada de los autores Feilong Ye, Zhiming Liu, Xiaoxiao Zhu, Weihao Zhu, Guojun Cai & Long Wang, en su publicación del año 2023, donde obtuvo 5.05×10^{-5} Watts, muy por debajo de la potencia obtenida por el módulo propuesto en el presente estudio.

Finalmente, como se menciona en las bases teóricas de los autores Heller, Teixeira, Jeremías, Brusamarello & Pérez, en su publicación del año 2023, la generación eléctrica de un módulo piezoeléctrico puede emplearse para suministrar energía a focos LED. Por lo tanto, la potencia de 0.0686 Watts, puede ser aprovechable para cualquier carga de corriente continua.

V. CONCLUSIONES

Para el primer objetivo, se concluye que el diseño propuesto fue seleccionado únicamente por los reducidos costos involucrados y la disponibilidad de los materiales para el ensamblaje del módulo.

Para el segundo objetivo, se puede inferir que la fuerza ejercida sobre el mismo solo logra deformar un 0.09 milímetros la superficie del módulo. No obstante, la deformación promedio se sitúa en 0.06 milímetros.

Para el tercer objetivo, se puede concluir que la conexión en serie de los 16 sensores piezoeléctricos en serie y abarcando un área de 30x30 centímetros, dispone de mayor uniformidad en la generación de energía eléctrica.

Para el cuarto objetivo, se concluye que el módulo piezoeléctrico genera 0.0686 Watts en corriente continua, donde el sistema dispone de una eficiencia de tan solo 3.77%, pero un retorno de la inversión de 7 meses.

VI. RECOMENDACIONES

Para el primer objetivo, se sugiere realizar una evaluación de la matriz morfológica en función de la eficiencia del mismo, reduciendo la relevancia de los costos asociados y la disponibilidad de los materiales.

Para el segundo objetivo, se sugiere ejecutar simulaciones con el módulo completamente ensamblado, para determinar más precisamente las deformaciones y esfuerzos ejercidos en el mismo.

Para el tercer objetivo, se sugiere realizar conexiones de más sensores piezoeléctricos, para evaluar con mayor exactitud cual es el tipo de conexión más eficiente para el sistema.

Para el cuarto objetivo, se sugiere aplicar una carga equivalente a la energía generada por el módulo piezoeléctrico, de forma que se pueda evaluar el comportamiento del mismo.

REFERENCIAS

BAENA, Guillermina. Metodología de la investigación. 3.a. ed. México: Grupo Editorial Patria. 2017. 157 pp. ISBN 9786077447481.

CABEZAS, Edison, NARANJO, Diego y SANTAMARÍA, Johana. Introducción a la metodología de la investigación científica. Ecuador: Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. 2018. 138 pp. ISBN 9789942765444

CEGARRA, José. Metodología de la Investigación Científica y Tecnología. España: Ediciones Diaz de Santos. 2004. 372 pp. ISBN: 8479786248

SU HAN, Hyeon & KO, Junghyuk. Power-Generation Optimization Based on Piezoelectric Ceramic Deformation for Energy Harvesting Application with Renewable Energy. Energies [en línea]. 13 de abril 2021, volumen 14, n° 8. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2171>

FRAPORTI, Lucas, TEIXEIRA, Lélío, JEREMIAS, Marcos, BRUSAMARELLO, Valner & PERES, Washington. Development of a Pavement-Embedded Piezoelectric Harvester in a Real Traffic Environment. MDPI: Sensors [en línea]. 02 de Marzo del 2023, volumen 23, n° 9. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/9/4238>

YE, Feilong, LIU, Zhiming, ZHU, Xiaoxiao, ZHU, Weihao, CAI, Guojun & WANG, Long. Research on Integrated Electrical And Mechanical Response of Piezoelectric Asphalt Pavement Material Under Bidirectional Cyclic Loads. ELSEVIER [en línea]. Abril 2023, volumen 375. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823006694?via%3Dihub>

WU, Nan, BAO, Bin, WANG, Quan. Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output. ELSEVIER [en línea]. Mayo 2021, volumen 235. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029621002182?via%3Dihub>

SEZER, Nurettin, KOÇ, Muammer. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. ELSEVIER [en línea]. 05 de Noviembre 2020,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520311411?via%3Dihub>

AABID, Abdul, RAHEMAN, Abdul, IBRAHIM, Yasser, ANJUM, Asraar, HRAIRI, Meftah, PARVEEZ, Bisma, PARVEEN, Nagma & ZAYAN, Jalal. A Systematic Review of Piezoelectric Materials and Energy Harvesters for Industrial Applications. MDPI: Sensors [en línea]. 16 de Junio 2021, volumen 21, n° 12. Disponible en <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4145>

LV, Fu, HONG, Zijian, AHMAD, Zeeshan, LI, Hanying, WU, Yongjun & HUANG, Yuhui. Design of Flexible Piezoelectric Nanocomposite for Energy Harvesters: A Review. Energy Material Advances: A Science Partner Journal [en línea]. 18 de Julio del 2023, volumen 4. Disponible en <https://spj.science.org/doi/10.34133/energymatadv.0043>

DEWANJEE, Joy & ISLAM, Shabiul. Piezoelectric based V-shape cantilever beam design of energy harvester for biomedical applications. AKJournals [en línea]. 27 de Junio del 2023. Disponible en <https://akjournals.com/view/journals/1848/aop/article-10.1556-1848.2023.77652/article-10.1556-1848.2023.77652.xml>

TICHÝ, Jan, ERHART, Jiri, KITTINGER, Erwin & PRIVRATSKA, Jana. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials. 2010. 187 pp. ISBN 978-3-540-43966-0.

GAUTSCHI, Gustav. Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers. 2002. 257 pp. ISBN 3540422595.

GALASSI, Carmen, DINESCU, Maria, UCHINO, Kenji & SAYER, Michael. Piezoelectric Materials: Advances in Science, Technology and Applications. 2000. 391 pp. ISBN 978-0-7923-6213-5.

MOROCHO, Braulio & ORDONEZ, Brayan. Ingeniería básica de una baldosa piezoeléctrica para el Harvesting de energía ambiental. Universidad Técnica Particular de Loja [en línea]. 25 de Enero 2019. Disponible en <https://es.scribd.com/document/399650327/Ingenieria-de-diseno-de-baldosas-piezoelctricas>

RODRÍGUEZ, Jhon & OCHOA, Yonatan. Prototipo de generación de energía eléctrica por medio de materiales piezoeléctricos. Tesis (Titulación de Grado). Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021. Disponible en <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/29750#:~:text=Con%20el%20desarrollo%20de%20este%20proyecto%20se%20logr%C3%B3,la%20Universidad%20Distrital%20Francisco%20Jos%C3%A9%20Caldas%2C%20sede%20tecnol%C3%B3gic>

HASSAN, Alaa, SHABOURY, Aya, MOHAMED, Karim, ASKAR, Mohamed, MOWAFY, Osama, MOSAAD, Yasmine, HASSAN, Ali & MOSTAFA, Hassan. A high-efficiency piezoelectric-based integrated power supply for low-power platforms. ELSEVIER. Agosto 2020, volumen 102. Disponible en [A high-efficiency piezoelectric-based integrated power supply for low-power platforms - ScienceDirect](#)

MOUSSA, Rania. Installing Piezoelectric tiles in Children Outdoor Playing areas to Create Clean & Healthy Environment; Case Study of El-Shams Sporting Club, Cairo Egypt. WSEAS Transactions on Environment and Development [en línea]. 10 de Junio 2020, volumen 16. Disponible en <https://www.wseas.org/multimedia/journals/environment/2020/a965115-028.pdf>
E-ISSN: 2224-3496

VIZZARI, Domenico, GENNESSEAU, Eric, LAVAUD, Stéphane, BOURON, Stéphane & CHAILEUX, Emmanuel. Pavement energy harvesting technologies: a critical review. RILEM: Technical Letters [en línea]. 20 de Agosto 2021. Disponible en <https://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/download/131/142/1385>

WANG, Sheng, TSAI, Ching & WU, Tsung. The Analysis and Design of a High Efficiency Piezoelectric Harvesting Floor with Impacting Force Mechanism. MDPI: Crystals [en línea]. 06 de Abril 2021, volumen 11, n° 4. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/4/380>

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ. Código de ética del colegio de ingenieros del Perú. 2018. Perú. 1987. 36 pp. Disponible en https://www.cip.org.pe/publicaciones/reglamentosCNCD2018/codigo_de_etica_del_cip.pdf

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ. Código deontológico del colegio de ingenieros del Perú. 2012. Perú. 2018. 33 pp. Disponible en https://www.cip.org.pe/publicaciones/2018/CODIGO_DEONTOLOGICO2012.pdf

XU, Qianqian, GAO, Xinyu, ZHAO, Senfeng, LIU, You, ZHANG, Dou, ZHOU, Kechao, KHANBAREH, Hamideh, CHEN, Wansong & ZHANG, Yan, BOWEN, Chris. Construction of Bio-Piezoelectric Platforms: From Structures and Synthesis to Applications. Advanced Science News [en línea]. 25 de Mayo del 2021, volumen 33. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202008452>

BELL, Andrew, COMYN, Tim & STEVENSON, Timothy. Expanding the application space for piezoelectric materials. AIP Publishing [en línea]. 04 de Enero 2021, volumen 9. Disponible en <https://pubs.aip.org/aip/apm/article/9/1/010901/279667/Expanding-the-application-space-for-piezoelectric>

QIAN, Weiqi, YANG, Weiyu, ZHANG, Yan, BOWEN, Chris & YANG, Ya. Piezoelectric Materials for Controlling Electro-Chemical Processes. Springer [en línea]. 14 de Julio 2020, volumen 12, n° 149 . Disponible en <https://pubs.aip.org/aip/apm/article/9/1/010901/279667/Expanding-the-application-space-for-piezoelectric> ISSN 2311-6706

KAPAT, Kausik, SHUBHRA, Quazi, ZHOU, Miao & LEEUWENBURGH, Sander. Piezoelectric Nano-Biomaterials for Biomedicine and Tissue Regeneration. Wiley – VCH Verlag GmbH & Co [en línea]. 2020. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/adfm.201909045>

MAHAPATRA, Susmiti, MOHAPATRA, Preetan, ARIA, Adrianus, CHRISTIE, Graham, MISHRA, Yogendra, HOFMANN, Stephan & THAKUR, Vijay. Piezoelectric Materials for Energy Harvesting and Sensing Applications: Roadmap for Future Smart Materials. Wiley – VCH Verlag GmbH & Co [en línea]. 2021, volumen 8. Disponible en

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/advs.202100864>

DENG, Weili, ZHOU, Yihao, LIBANORI, Alberto, CHEN, Guorui, YANG, Weiqing & CHEN, Jun. Piezoelectric nanogenerators for personalized healthcare. Royal Society of Chemistry [en línea]. 22 de Diciembre 2021, volumen 51. Disponible en <http://www.polymer.cn/UploadFile/research/202205110927200075.pdf> ISSN 0306-0012

RATHOD, Vivek. A Review of Acoustic Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors and Transducers. MDPI: Sensors [en línea]. 21 de Julio 2020, volumen 20. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/14/4051>

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de operacionalización de variables

Variable de estudio	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente: Piezas Piezoeléctrica	<p>Las piezas piezoeléctricas están constituidas por materiales solidos con estructuras cristalinos o amorfos. Los tipos de solidos amorfos no cuentan con cadena de orientación (a lo larga distancia), por lo tanto, se vuelven solidos irregulares. Los sólidos cristalinos tienen átomos que ordenan repetibilidad definida, uniforme, dimensional y larga distancia (Pizarro y Pacheco).</p>	<p>Para la caracterización del piezoeléctrico se desarrollaron una serie de pruebas para determinar el mejor material de acuerdo con sus propiedades físicas y mecánicas que estará en contacto con la cerámica del piezoeléctrico, para ello se escogen diferentes tipos de materiales para ver el comportamiento de la deformación del piezoeléctrico para reducir el desgaste de los piezoeléctricos y verificar la mejor opción (Jhon Rodríguez, 2021).</p>	Materiales	Propiedades Físicas	Intervalo
				Propiedades eléctricas	Intervalo
			Conexión	Serie	Intervalo
				Paralelo	Intervalo
				Mixta	Intervalo
			Variable dependiente: Generación de energía eléctrica	<p>La generación de energía con materiales piezoeléctricos es una tecnología amigable con el medio ambiente, su funcionamiento se basa en las vibraciones producto de una fuerza, ésta última debe variar en el tiempo para la generación de un voltaje constante (Rodríguez, 2021).</p>	<p>El desarrollo y las aplicaciones de los dispositivos de consumo de energía eléctrica han sido bien estudiados desde 1854 como uno de los temas de investigación práctica para generación eficiente de energía eléctrica (Nan Wu, 2021).</p>

