# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

## CARRERA DE ELECTRICIDAD

**TEMA:** SISTEMA DE CARGA PARA APROVECHAR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS PARA CARGAR LA BATERIA DE UN CELULAR.

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico


**AUTOR:**

Juan Carlos Criollo Aguilar

**DIRECTOR:**

Ing. Julio Esteban Guerra Massón. MSc.



Ibarra – Ecuador

2025

# AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| **DATOS DE CONTACTO** | | | |
|---|---|---|---|
| **CÉDULA DE IDENTIDAD:** | 100460272-6 | | |
| **APELLIDOS Y NOMBRES:** | Criollo Aguilar Juan Carlos | | |
| **DIRECCIÓN:** | Otavalo, parroquia San Rafael, comunidad Cachiviro. | | |
| **EMAIL:** | jccriolloa@utn.edu.ec | | |
| **TELÉFONO FIJO:** | S/N | **TELÉFONO MÓVIL:** | 0939462947 |

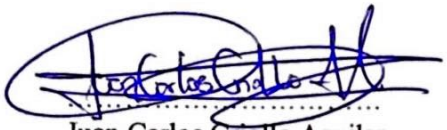
| **DATOS DE LA OBRA** | |
|---|---|
| **TÍTULO:** | SISTEMA DE CARGA PARA APROVECHAR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS PARA CARGAR LA BATERIA DE UN CELULAR. |
| **AUTOR (ES):** | Juan Carlos Criollo Aguilar |
| **FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA** | 01/08/2025 |
| **PROGRAMA:** | ■ **PREGRADO** □ **POSGRADO** |
| **TITULO POR EL QUE OPTA:** | **Ingeniero(a) Eléctrico(a)** |
| **ASESOR /DIRECTOR:** | Ing. Julio Esteban Guerra Massón. MSc. |

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 01 días del mes de agosto de 2025

**EL AUTOR:**



Juan Carlos Criollo Aguilar

# CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Ing. Julio Estaban Guerra Massón. MSc. en calidad de director del señor estudiante Criollo Aguilar Juan Carlos certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: **"SISTEMA DE CARGA PARA APROVECHAR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS PARA CARGAR LA BATERIA DE UN CELULAR".**

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....

Ing. Julio Esteban Guerra Massón. MSc.

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## DEDICATORIAS

Todo el tiempo y esfuerzo invertidos en el desarrollo del presente trabajo de integración curricular están dedicados a mis amados padres y hermanos, quienes han sido y seguirán siendo un pilar fundamental en cada una de mis metas alcanzadas. Gracias por brindarme su apoyo incondicional día tras día.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios, por brindarme la fortaleza y claridad necesarias para culminar esta etapa académica.

De todo corazón, extiendo un enorme agradecimiento a mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional, comprensión y constante motivación. Asimismo, valoro profundamente el respaldo tanto económico como moral que me han brindado a lo largo de este proceso.

A mi director de tesis, MSc. Julio Guerra, y a mi asesora, MSc. Isabel Quinde, por su valiosa orientación, por guiarme con sabiduría y exigencia intelectual para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, expreso mis agradecimientos a mis amigos de la carrera, por su amistad, colaboración y por compartir conmigo experiencias universitarias llenas de retos y aprendizajes.

## Tabla de contenido

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE ..... II

DEDICATORIAS ..... V

AGRADECIMIENTOS ..... VI

Tabla de contenido ..... VII

Índice de figuras ..... XII

Índice de tablas ..... XV

RESUMEN ..... XVI

ABSTRACT ..... XVII

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN ..... 1

1.1. Problema de investigación ..... 1

1.2. Formulación del problema ..... 1

1.3. Objetivos ..... 1

1.3.1. Objetivo general ..... 2

1.3.2. Objetivos específicos ..... 2

1.4. Alcance ..... 2

1.5. Justificación ..... 3

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO ..... 5

2.1. Contextualización ..... 5

2.2. Recolectores de energía / Energy Harvesting ..... 7

2.2.1. Aplicaciones de los recolectores de energía ..... 9

2.3. Métodos de recolección de energía ..... 10

2.3.1. Método piezoeléctrico ..... 10

2.3.2. Método electrostático ..... 11

2.3.3. Método electromagnético ..... 12

2.4. Aprovechamiento de los recolectores de energía ..... 12

2.4.1. Aprovechamiento eléctrico ..... 12

2.5. El efecto piezoeléctrico ..... 13

2.5.1. Generadores piezoeléctricos ..... 15

2.5.2. Funcionamiento de los generadores piezoeléctricos ..... 16

2.6. Materiales piezoeléctricos ..... 17

2.6.1. Materiales piezoeléctricos naturales ..... 18

2.6.2. Materiales piezoeléctricos sintéticos ..... 18

2.6.3. Eficiencia de la tecnología piezoeléctrica ..... 19

2.7. Aplicaciones de la energía piezoeléctrica ..... 20

2.8. Almacenamiento de la energía piezoeléctrica generada ..... 24

2.8.1. Tipos de baterías o acumulador de energía ..... 25

CAPÍTULO III

MÉTODOS Y MATERIALES ..... 28

3.1. Descripción de la metodología ..... 28

3.1.1. Alcance de la investigación ..... 29

3.2. Procedimiento ..... 30

3.3. Materiales ..... 34

3.3.1. Materiales utilizados para la implementación ..... 34

3.3.2. Softwares utilizados ..... 41

3.4. Ecuaciones ..... 43

3.4.1. Generación de energía mediante los pasos humanos ..... 44

3.5. Parámetros eléctricos y mecánicos aplicables al sistema piezoeléctrico. ... 44

3.6. Constantes piezoeléctricas ..... 44

3.6.1. Efecto piezoeléctrico directo ..... 45

3.6.2. Constante de carga (d) ..... 45

3.6.3. Efecto piezoeléctrico inverso ..... 45

3.7. Modelos matemáticos de los parámetros eléctricos ..... 45

3.7.1. Tensión eléctrica por deformación del material piezoeléctrico PZT .. 46

3.7.2. Intensidad de corriente del material PZT ..... 46

3.7.3. Potencia generada por el material PZT ..... 47

3.7.4. Tiempo de carga de la batería ..... 48

3.7.5. Tiempo de descarga del sistema ..... 48

3.7.6. Área de acción del sensor piezoeléctrico ..... 48

3.8. Modelo matemático de los parámetros mecánicos ..... 48

3.8.1. Fuerza aplicada a los materiales piezoeléctricos ..... 49

3.8.2. Energía mecánica (Em) ..... 49

3.8.3. Distancia recorrida en pasos ..... 50

3.8.4. Frecuencia de pasos por minutos (PPM) ..... 50

3.8.5. Frecuencia de pasos en Hertz (Hz) ..... 51

3.8.6. Velocidad de pasos (m/s) ..... 51

3.8.7. Energía generada por pasos (J) ..... 51

3.8.8. Presión ejercida por una persona ..... 52

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS ..... 53

4.1. Pruebas de generación en los dispositivos piezoeléctricos ..... 53

4.1.1. Tensión generada por impulso directo ..... 53

4.1.2. Corriente generada por impulso directo ..... 57

4.2. Voltaje DC generado con módulo LTC-3588 ..... 58

4.2.1. Gráfica de voltaje de los elementos piezoeléctricos ..... 60

4.3. Desarrollo del prototipo de la plantilla para los dispositivos piezoeléctricos ..... 61

4.4. Circuito de carga ..... 65

4.4.1. Controlador de carga ..... 65

4.4.2. Batería o acumulador ..... 66

4.5. Circuito del generador piezoeléctrico y almacenamiento de energía ..... 66

4.5.1. Circuito de conexión de los piezoeléctricos ..... 67

4.5.2. Circuito de almacenamiento de energía ..... 68

4.6. Implementación del prototipo ..... 69

4.6.1. Plantillas piezoeléctricas ..... 69

4.6.2. Integración de los dispositivos piezoeléctricos ..... 70

4.6.3. Sistema de almacenamiento y carga ..... 72

4.6.4. Sistema de medición y captura de datos ..... 72

4.6.5. Integración final del prototipo ..... 73

4.7. Cálculo de los parámetros eléctricos y mecánicos ..... 74

4.7.1. Medición de la masa corporal de los sujetos de prueba. ..... 74

4.7.2. Generación de energía mediante los pasos humanos ..... 76

4.7.3. Cálculo de la energía generada por pasos (J)..... 82

4.7.4. Cálculo del efecto piezoeléctrico..... 83

4.7.5. Variación de la presión ejercida por una persona. ..... 84

4.7.6. Cálculo de la generación de voltaje ..... 85

4.7.7. Cálculo de la generación de corriente..... 88

4.8. Pruebas de funcionamiento del prototipo ..... 90

4.8.1. Señal de entrada AC obtenida del prototipo ..... 90

4.8.2. Señal en la etapa de rectificación ..... 91

4.8.3. Generación de voltaje AC con frecuencia de 1,5 pasos por segundo en el prototipo desconectado del sistema de control y captura de datos ..... 91

4.8.4. Generación de voltaje DC con frecuencia de 1,5 pasos por segundo en el prototipo conectado a los sistemas de carga y captura de datos ..... 93

4.8.5. Análisis de resultados ..... 101

CONCLUSIONES ..... 103

RECOMENDACIONES ..... 104

Referencias bibliográficas..... 105

Anexos.....112

## Índice de figuras

Fig. 1. Sistema de Energy Harvesting. ..... 9
Fig. 2. Esquema de un piezoeléctrico. ..... 11
Fig. 3. Principio de funcionamiento del recolector electrostático. ..... 11
Fig. 4. Monocristal ..... 13
Fig. 5. Policristal. ..... 14
Fig. 6. Efecto piezoeléctrico de forma longitudinal, transversal y/o diagonal. ..... 15
Fig.7. Funcionamiento de un generador piezoeléctrico. ..... 17
Fig. 8. Tipos de baterías ..... 25
Fig. 9. Etapas para el almacenamiento y aplicación de la energía piezoeléctrica ..... 27
Fig. 10. Metodología empleada para el presente trabajo de grado. ..... 31
Fig. 11. A) Prueba 1 de voltaje generado. B) Prueba 2 de voltaje generado ..... 54
Fig. 12. Señal de voltaje generado en el piezoeléctrico flexible. ..... 55
Fig. 13. A) Prueba 1 de tensión generada. B) Prueba 2 de tensión generada. ..... 55
Fig. 14. Señal generada por la fuerza aplicada directamente a un disco piezoeléctrico. 56
Fig. 15. A) Prueba 1 de la medición de corriente eléctrica. B) Prueba 2 de la medición de corriente eléctrica. ..... 57
Fig. 16. A) Prueba 1 de la medición de corriente DC. B) Prueba 2 de la medición de corriente DC ..... 58
Fig. 17. A) Conexión del LTC 3588 con disco piezoeléctrico. B) Conexión del LTC 3588 con piezoeléctrico flexible ..... 59
Fig. 18. A) Gráfica de voltaje con disco piezoeléctrico. B) Gráfica de voltaje con piezoeléctrico flexible ..... 60
Fig. 19. A) Vista frontal de la plantilla piezoeléctrica 3D. B) Vista posterior con bases para la ubicación de los piezoeléctricos en la plantilla 3D. ..... 62
Fig. 20. Plantilla ergonómica con arco. ..... 64
Fig. 21. Diseño del generador piezoeléctrico y circuito de carga ..... 67
Fig. 22. Conexión de piezoeléctricos en paralelo ..... 68
Fig. 23. Diseño representativo de la etapa de rectificado, filtrado y almacenamiento ... 69
Fig. 24. A) Piezoeléctrico flexible de PVDF. B) Disco piezoeléctrico cerámico. ..... 70

Fig. 25. A) Montaje de piezoeléctricos flexibles. B) Montaje con discos piezoeléctricos ..... 70

Fig. 26. Integración de las plantillas al sistema. ..... 71

Fig. 27. Circuito de carga y almacenamiento. ..... 72

Fig. 28. Sistema de medición y captura de datos. ..... 72

Fig. 29. Integración final de prototipo. ..... 73

Fig. 30. Masa corporal de los sujetos de prueba: A) Sujeto de prueba 1, B) Sujeto de prueba 2 y C) Sujeto de prueba 3 ..... 75

Fig. 31 A) Frecuencia de pasos. B) Potencia generada ..... 81

Fig. 32. A) Presión ejercida con diferentes pesos. B) Presión ejercida en diferentes zonas del pie. ..... 84

Fig. 33. A) Voltaje generado por paso – sujeto de 60,25 kg. B) Voltaje generado por paso – sujeto de 69 kg. C) Voltaje generado por paso– sujeto de 84.55 kg. ..... 87

Fig. 34. A) Corriente generada por paso – sujeto de 60,25 kg. B) Corriente generada por paso – sujeto 69 kg. C) Corriente generada por paso – sujeto de 84,55 kg. ..... 89

Fig. 35. Señal AC generada de las plantillas piezoeléctricas ..... 90

Fig. 36. Señal DC en la etapa de rectificación de las plantillas piezoeléctricas ..... 91

Fig. 37. Pruebas de voltaje, sujeto 1 con peso de 60.25 kg. B) Señal de voltaje generado, peso 60.25 Kg. ..... 92

Fig. 38. A) Pruebas de voltaje sujeto 2, peso 69 kg. B) Señal de voltaje generado, peso 69 Kg ..... 92

Fig. 39. A) Pruebas de voltaje sujeto 3, peso 84.55 kg. B) Señal de voltaje generado, peso 84.55 Kg. ..... 93

Fig. 40. A) Prueba de voltaje generado por el sujeto 1, peso 60.25 kg. B) Gráfica del voltaje generado por el sujeto 1, peso 60.25 kg. ..... 95

Fig. 41. A) Pruebas de voltaje generado por el sujeto 2 peso 69kg. B) Gráfica de voltaje generado por el sujeto 2, peso 69 kg. ..... 96

Fig. 42. A) Prueba de voltaje generado por el sujeto 3, peso 90kg. B) Gráfica del voltaje generado por el sujeto 3, peso 84.55kg. ..... 97

Fig. 43. Generación de voltaje por peso. ..... 98

Fig. 44. A) Prueba de voltaje generado por el sujeto 2, peso 69kg. B) Gráfica del voltaje generado por el sujeto 2, peso 69 kg. ..... 100

Fig. 45. Prueba de carga de la batería de almacenamiento de Li-Ion de 3,7 V..... 101

## Índice de tablas

Tabla I Materiales piezoeléctricos más comunes ..... 17
Tabla II Eficiencia de la tecnología piezoeléctrica ..... 19
Tabla III Aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas ..... 22
Tabla IV Tipos de baterías más importantes ..... 25
Tabla V Especificaciones técnicas del sensor piezoeléctrico ..... 35
Tabla VI Especificaciones técnicas del puente de diodos ..... 36
Tabla VII Especificaciones técnicas del capacitor electrolítico ..... 36
Tabla VIII Especificaciones técnicas de una batería de iones de litio de 3.7 V ..... 37
Tabla IX Datos generales de una resistencia de 220 ohmios ..... 38
Tabla X Especificaciones técnicas del diodo 1N4007 ..... 38
Tabla XI Especificaciones técnicas del regulador de voltaje LM7805 ..... 39
Tabla XII Especificaciones técnicas del circuito amplificador ..... 40
Tabla XIII Especificaciones técnicas del LTC 3588-1 ..... 40
Tabla XIV Cantidad de pasos por tipo de desplazamiento ..... 77
Tabla XV Parámetros por sujeto y tipo de desplazamiento ..... 78
Tabla XVI Valores de frecuencia de pasos por minuto y tiempo en realizar un paso ..... 79
Tabla XVII Potencia generada por pasos ..... 80
Tabla XVIII Generación de energía mecánica (J) mediante pasos humanos ..... 82
Tabla XIX Valores obtenidos del cálculo de la densidad de carga ..... 83
Tabla XX Voltaje generado por fuerza aplicada ..... 86

## RESUMEN

En los últimos años, la demanda de energías renovables ha aumentado notablemente. En este contexto, se desarrolló un prototipo que emplea un innovador sistema de carga basado en cerámicos piezoeléctricos, cuyo propósito es convertir la energía mecánica en eléctrica para alimentar dispositivos de bajo consumo, como baterías de teléfonos móviles, incrementando así su autonomía.

El generador piezoeléctrico está diseñado para transformar la fuerza mecánica de compresión, generada al caminar o correr, en energía eléctrica. La captación de energía mecánica resulta fundamental para obtener fuentes de energía limpia y sostenible, por lo que este trabajo se enfoca en el aprovechamiento de dicha energía que potencien las fuentes existentes de dicha energía.

El diseño del sistema se organizó en cuatro etapas fundamentales. Primero, se determinaron los parámetros eléctricos y mecánicos. A continuación, se seleccionaron los materiales óptimos para la fabricación de la plantilla y del componente piezoeléctrico, priorizando durabilidad y eficiencia. En la tercera etapa, se diseñaron los circuitos de transmisión y rectificación que convierte la señal alterna (CA) generada en corriente continua (CC). Posteriormente, se integró una batería de iones de litio para almacenar la energía y un circuito de descarga que suministre de manera controlada. Finalmente, se realizaron pruebas para evaluar el comportamiento del sistema bajo cargas mecánicas intensas, culminando con la validación y adquisición de datos del voltaje generado.

**Palabras clave:** Energía mecánica, Piezoelectricidad, Sistema de carga, Sistema de almacenamiento, Recolección de energía.

## ABSTRACT

In recent years, the demand for renewable energy has increased significantly. In this context, a prototype was developed that uses an innovative charging system based on piezoelectric ceramics. Its purpose is to convert mechanical energy into electrical energy to power low-consumption devices, such as mobile phone batteries, thus increasing their battery life.

The piezoelectric generator is designed to transform the mechanical compression force generated during walking or running into electrical energy. Harvesting mechanical energy is essential for obtaining clean and sustainable energy sources; therefore, this work focuses on harnessing this energy to enhance existing energy sources.

The system design was organized into four fundamental stages. First, the electrical and mechanical parameters were determined. Next, the optimal materials for the insole and piezoelectric component were selected, prioritizing durability and efficiency. In the third stage, the transmission and rectification circuits that convert the alternating current (AC) signal generated into direct current (DC) were designed. A lithium-ion battery was then integrated to store the energy, along with a discharge circuit to deliver it in a controlled manner. Finally, tests were conducted to evaluate the system's performance under intense mechanical loads, culminating in the validation and acquisition of data on the generated voltage.

**Keywords:** Mechanical energy, Piezoelectricity, Charging system, storage system, Energy harvesting.

# CAPÍTULO I

# INTRODUCCIÓN

**Tema:** Sistema de carga para aprovechar la generación de energía eléctrica partir de materiales piezoeléctricos para cargar la batería de un celular.

## 1.1. Problema de investigación

Actualmente, existen diversas formas para la generación de energía eléctrica, tanto a partir de fuentes no renovables como de fuentes renovables. Sin embargo, el crecimiento de la demanda energética ha provocado el agotamiento progresivo de los recursos no renovables. En este contexto, el uso de energías renovables se plantea como una alternativa sostenible para cubrir la demanda, mediante fuentes como la energía eólica, térmica, biomasa, fotovoltaica e hidroeléctrica.

Asimismo, el teléfono celular se ha vuelto una herramienta indispensable en la vida cotidiana de las personas, al facilitar la comunicación global y el acceso a múltiples aplicaciones útiles. Sin embargo, el inconveniente principal es la duración de la batería, la cual tiende a descargarse rápidamente en condiciones de uso intensivo. Obligando a depender constantemente de una fuente de alimentación eléctrica, lo que representa una desventaja en entornos donde no existe acceso a tomas de corriente. Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar nuevos sistemas alternativos de generación de energía, especialmente aquellas que transformen el esfuerzo mecánico en energía eléctrica útil. Además, actualmente no se aprovecha el esfuerzo mecánico generado por el movimiento humano durante actividades cotidianas como: caminar, trotar o correr. En este contexto, el uso de materiales piezoeléctricos representa una opción limpia y renovable, ya que la cantidad de energía generada es directamente proporcional al número de pisadas realizadas durante la marcha.

## 1.2. Formulación del problema

¿Se puede aprovechar la energía eléctrica generada y almacenada al momento de aplicar fuerza mecánica sobre los materiales piezoeléctricos?

## 1.3. Objetivos

En este apartado, se da a conocer el objetivo general y los objetivos específicos planteados para desarrollar y ejecutar el trabajo de integración curricular.

### 1.3.1. Objetivo general

Construir un prototipo de un sistema de carga que aproveche la generación de energía eléctrica a partir de materiales piezoeléctricos para cargar la batería de un celular

### 1.3.2. Objetivos específicos

1. Describir los procesos de generación y recolección de energía eléctrica producida por el esfuerzo mecánico sobre los materiales piezoeléctricos
2. Diseñar un sistema de carga para la captación y aprovechamiento de la energía eléctrica generada a partir de materiales piezoeléctricos para cargar la batería de un celular
3. Implementar un sistema de carga para aprovechar la energía generada y almacenada a partir de materiales piezoeléctricos para cargar la batería de un celular

## 1.4. Alcance

En el presente trabajo se propone el diseño y desarrollo de un sistema de carga para aprovechar la energía generada a partir de una plantilla piezoeléctrica, la cual actúa como generador. Este sistema tiene como función principal almacenar la energía generada y, de este modo, prolongar la duración de la batería de un dispositivo móvil. Es fundamental identificar quienes podrían usar y aprovechar esta tecnología. En este contexto, las personas jóvenes y/o deportistas pasan a ser una parte importante, puesto que las personas que realizan actividades seguidas pueden llegar a generar una mayor cantidad de energía. Esto se debe a que al momento que se aplica una fuerza mecánica sobre un material piezoeléctrico la convierte en energía eléctrica, lo que permite aprovechar de la mejor forma esta tecnología. Se realizarán pruebas de esta plantilla piezoeléctrica al momento de caminar, trotar o correr, debido a que es necesario estar en constante movimiento.

Para la construcción del prototipo de la plantilla piezoeléctrico se va a utilizar piezoeléctricos cerámicos rígidos y flexibles, donde se realizará la conexión en paralelo, por lo que se evidencia una mayor corriente en esta conexión, posteriormente, mediante el módulo LTC 3588-1 destinada para la recolección de energía piezoeléctrica, que integra internamente las etapas de rectificación, filtrado y regulación de la señal, se conseguirá un acondicionamiento más eficiente de las tensión generada por los elementos

piezoeléctricos. El diseño representativo del circuito se lo realizará en el software de Proteus Design Suite. Además, para almacenar la energía generada de dicho generador se realizará un sistema de almacenamiento (banco de energía), en la cual se va a utilizar una batería recargable de 3,7V, iones de litio, 2500 mA para almacenar la energía generada, además, se integrará un módulo de carga destinada a utilizar la energía acumulada y alimentar al dispositivo móvil.

Se tomará datos en un periodo de tiempo al momento de caminar, trotar o correr, las características que se observará será la contextura de la persona para poder tener un estimado del peso y poder relacionarlo con el voltaje resultante. A partir de los datos obtenidos se tabulará en una hoja de cálculo de Microsoft Excel y se podrá tener un aproximado del voltaje generado y almacenado en el banco de energía, posteriormente, alimentar la batería de un celular. Con esto se va a dar un promedio estimado de la energía eléctrica generada con relación a la cantidad de pasos.

## 1.5. Justificación

Hoy en día, el uso de los teléfonos celulares ha incrementado considerablemente a nivel mundial y se ha vuelto una herramienta importante del uso diario, en consecuencia, también se ha incrementado el consumo de energía, la cual da la necesidad de buscar nuevas formas de generar energía eléctrica.

Los dispositivos electrónicos, como reproductores mp3, los celulares inteligentes, necesitan recargas periódicas de sus baterías para mantener su funcionamiento. Cada dispositivo cuenta con un tiempo de carga y un nivel de consumo energético conforme su utilidad, de este modo, la utilización de fuentes renovables puede disminuir el consumo de energía eléctrica convencional. Cuando se descarga toda la batería del celular se desaprovecha la utilidad que brinda este dispositivo móvil, por ello, implementar un método de carga que también sea móvil se podría disminuir la necesidad de búsqueda de una toma de corriente eléctrica para la carga del celular.

Por lo tanto, es importante tener ideas que contribuyan a la producción de energía limpia y sustentable, tratando de cubrir parcialmente esta demanda, protegiendo el medio ambiente para las generaciones futuras. De modo que mediante el uso de sistemas capaces de generar y almacenar energía de manera sostenible puede reducir el impacto ambiental

que produce de la generación de energía por fuentes no renovables, existe la oportunidad de aprovechar la energía mecánica desaprovechada al momento de caminar, trotar o correr que podría ser una solución para estos problemas de necesidad. Este tipo de energía estará disponible casi la mayor parte del día gracias al constante movimiento donde se utiliza la tecnología piezoeléctrica. En el presente trabajo se plantea una alternativa para la generación de energía utilizando materiales piezoeléctricos y un sistema de almacenamiento para almacenar dicha energía y posteriormente ser utilizado para la carga de una batería de un celular, con la finalidad de poder aprovechar la energía generada al caminar durante el día y poder generar una carga suficiente para abastecer un celular.

# CAPÍTULO II

# MARCO TEÓRICO

En este capítulo se proporciona una descripción de la generación y recolección de energía eléctrica producida por el esfuerzo mecánico sobre los materiales piezoeléctricos, donde se dará a conocer los generadores piezoeléctricos, la piezoelectricidad, efecto piezoeléctrico, la recolección de energía piezoeléctrica y las aplicaciones de este sistema, se detallará como se va a generar energía eléctrica a partir de la piezoelectricidad y recolectar la energía generada para posteriormente aprovechar la energía acumulada.

## 2.1. Contextualización

Al tener la piezoelectricidad como una tecnología que se encuentra todavía en desarrollo se puede tener en cuenta que trata de un desarrollo nuevo, este fenómeno de la piezoelectricidad fue idealizado hace más de un siglo y medio por René Just Huay y Antoine César Becquerel al momento que estudiaron el efecto pirolítico, un procedimiento donde el material puede generar un potencial eléctrico mediante la alteración de la temperatura, sin embargo, no se pudo justificar su funcionamiento. En 1880 los hermanos Pierre y Jacques Curie dieron a conocer la piezoelectricidad, en la cual demostraron que al momento que se le aplica presión en los cristales como el cuarzo esta generaba cargas eléctricas en la superficie. [1]

El efecto piezoeléctrico mediante los materiales piezoeléctricos es denominado un material inteligente o multifuncional, ya que tienen la propiedad de reaccionar de manera relevante a estímulos como la presión mecánica, magnética y térmica, el descubrimiento de los hermanos Pierre y Jacques Curie demostraron que al momento de aplicar una presión mecánica sobre el cuarzo este se polarizaba llegando a tener pequeños arcos eléctricos, a la cual lo llamaron como efecto piezoeléctrico. Su origen proviene del griego “piezein” o “piezo” , la cual significa presionar y eléctrico de electrón. [2]

La piezoelectricidad da a conocer la relación que existe entre la tensión mecánica y una tensión eléctrica en la superficie o en los sólidos. Esta capacidad lo tiene solamente algunos materiales como serían los minerales, los cerámicos y algunos polímeros, ya que para generar una carga eléctrica se necesita aplicar fuerza mecánica. [3]

El principio de funcionamiento de un piezoeléctrico se basa en que varias secciones del cristal sean sometidas a fuerza de compresión, de tal forma que se genera una energía eléctrica. Generalmente son utilizados en dos secciones de cristales insertando en ambas un solo electrodo, ya que toda la estructura es incrustada dentro de una carcasa, donde el electrodo y la carcasa tiende a absorber la energía eléctrica y de esta forma puedan transmitir a un amplificador de carga mediante un cable de carga coaxial. [4]

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica desempeñan un papel crucial en la descarbonización de los sistemas energéticos, ya que permiten gestionar la intermitencia inherente a las fuentes renovables como la solar y la eólica. En este contexto, la generación de energía mediante sensores piezoeléctricos, que convierten vibraciones mecánicas en electricidad, representa una alternativa prometedora, especialmente en entornos urbano o infraestructuras con alto tránsito, como carreteras o estaciones de transporte público. Actualmente, existen diversas herramientas de simulación y software especializados para analizar la eficiencia de sistemas de almacenamiento convencionales, como los fotovoltaicos, las turbinas en centrales geotérmicas o las baterías de litio. Sin embargo, se ha identificado una carencia significativa de plataformas que ofrezcan metodologías para optimizar el almacenamiento de energía por materiales piezoeléctricos. A pesar de esta limitación, se han desarrollado simulaciones y modelados matemáticos que permiten estudiar el comportamiento de los materiales piezoeléctricos. Estas herramientas posibilitan el análisis de la generación de energía piezoeléctrica, lo que a su vez facilita el diseño del sistema de carga y almacenamiento de energía mediante sensores piezoeléctricos. [5]

Se debe dar un análisis al comportamiento mecánico de los sensores piezoeléctricos, ya que de esta forma se puede realizar un circuito eléctrico equivalente del comportamiento de los sensores piezoeléctricos mediante el análisis energético del sistema, de tal manera que se pueda determinar la ecuación del comportamiento del material piezoeléctrico y realizar una evaluación para su posible aplicación, con el fin de obtener cálculos estimados del sistema eléctrico, de modo que se desarrollará el diseño teniendo en cuenta las limitaciones del lugar. [2]

Hoy en la actualidad a nivel internacional la demanda de energía eléctrica está en aumento, ya que el uso de los recursos no renovables como una principal fuente para la generación de energía, genera una dependencia en la sociedad, puesto que hoy en la actualidad el 87% del consumo de energía primaria proviene de los recursos no renovables como sería el carbón, gas natural, el petróleo y uranio. [6]

La generación de energía eléctrica de manera limpia y sostenible a partir del material piezoeléctrico se tiene como un dispositivo para aprovechar, ya tiene la propiedad de energizarse eléctricamente cuando se aplica una presión eléctrica, en pocas palabras se podría decir que es la capacidad con la cuentan ciertos materiales para la generación de energía eléctrica al ser accionados o pulsados, puesto que se busca una mejor eficiencia energética y sostenibilidad para poder promover la posibilidades de utilizar energía limpia, por lo que la piezoelectricidad llega a ser uno de los más interesantes al generar energía eléctrica cuando se somete a tensiones mecánicas, también se puede dar este mismo proceso pero a la inversa, de tal modo que los propios materiales se distorsiona cuando se les aplica un campo eléctrico, sin embargo, al momento que se interrumpe dicho proceso tienen la capacidad de volver a su estado normal. [7]

## 2.2. Recolectores de energía / Energy Harvesting

Existen distintas fuentes de generación de energía que son desperdiciadas y pasan desapercibidas en el medio ambiente, como por ejemplo las ondas electromagnéticas o las vibraciones mecánicas. La posibilidad de almacenar este tipo de energía y convertirla en energía eléctrica es uno de los motivos fundamentales para el desarrollo de los dispositivos de recolección de energía. La recolección de energía se vuelve importante por la utilidad que brinda y los efectos beneficiosos que tiene para poder reducir el uso del carbono en el medio ambiente. Una de las formas para recolectar energía es utilizar los materiales ferroeléctricos como son los materiales o dispositivos piezoeléctricos, ya que dichos dispositivos son utilizados para convertir las vibraciones o fuerza mecánica del ambiente en energía eléctrica que puede ser aprovechado. [8]

Energy Harvesting es una etapa donde la energía que proviene de fuentes externas como la energía luminosa, energía térmica o energía mecánica, es transformada a energía eléctrica, esta energía se puede almacenar para poder aprovecharla como una fuente de

energía en las alimentaciones de sistemas electrónicos de bajo consumo, como por ejemplo el uso en los sistemas de redes de sensores inalámbricas. Sin embargo, la mayoría de las veces no es posible conseguirlo mediante el Energy Harvesting una alimentación que sea totalmente autónoma, por otra parte, es posible alargar la vida de las baterías de los sistemas electrónicos, motivando la utilización de esta técnica de alimentación. Este tipo de sistemas es muy llamativo en lugares donde no existe una red de suministro eléctrico, ya que se tiene que minimizar al máximo la situación de las baterías, en algunos casos un sistema de Energy Harvesting es la mejor solución por la fiabilidad de este sistema. [9]

Para la recolección de energía, los piezoeléctricos reciben una gran importancia debido a la propiedad que tiene de generar energía eléctrica al momento que es expuesta a una fuerza o deformaciones mecánicas externas o también pueden deformarse al momento que son sometidos a un campo eléctricos. Las deformaciones pueden surgir de diferentes fuentes, como por ejemplo el movimiento humano, vibraciones sísmicas de baja frecuencia, ruido acústico, entre otras. [8]

La energía en un sistema, al principio no se encuentra en energía eléctrica y no es adecuado para que pueda ser aprovechada dicha energía, debido a esto el circuito de carga pasará por varios estados, desde la presencia de fuerza mecánica de los materiales piezoeléctricos hasta la conversión a energía eléctrica en forma de corriente continua que se desea obtener, en la Fig. 1 se puede observar un diagrama que se muestra los diferentes estados por los que debe pasar la energía en un sistema de recolección de energía o también conocido como Energy Harvesting para posteriormente aprovecharla y utilizarla de forma eficiente. [10]

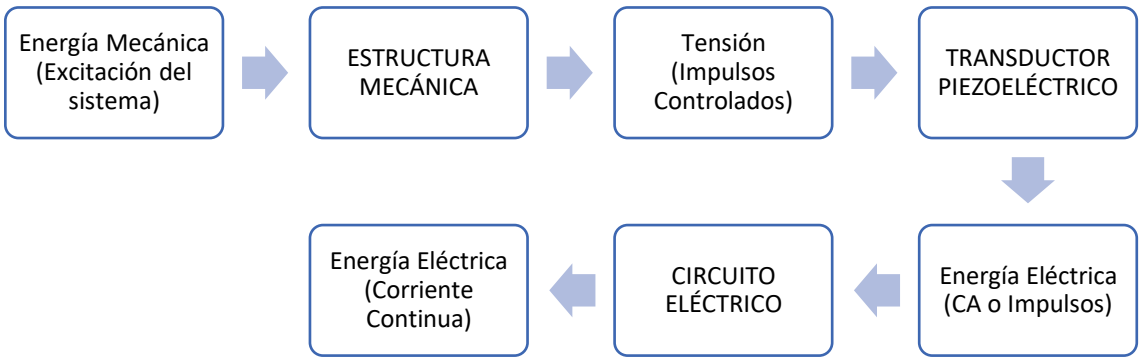



**Fig. 1.** Sistema de Energy Harvesting. **[10]**

Desde el momento en que se capta la energía mecánica o la excitación del sistema por el sistema de los recolectores de energía, esta energía pasa por distintos estados hasta que se transforma en corriente continua y sea aprovechable para su utilización, ya que será la que alimente la carga, ya sea una batería, un LED u otro cualquier dispositivo de baja potencia. [10]

Los métodos que comúnmente se utilizan para la recolección de energía pueden dividirse en 4 categorías: electromagnética, electrostática, piezoeléctrica y triboeléctrica, cada una de estas categorías conllevan tanto ventajas como desventajas, sin embargo, la recolección de energía piezoeléctrica se pueden encontrar los dispositivos que generan mayor densidad de potencia y son fáciles de incorporar en distintos dispositivos para los sistemas que tengan tecnología MEMS (Dispositivos Micro Electromagnéticos). [11]

### 2.2.1. Aplicaciones de los recolectores de energía

Las aplicaciones de los recolectores de energía son diversas, como en la medicina por ejemplo se coloca en el propio cuerpo de los pacientes micro dispositivos de medida y actuación que puedan controlar algunos parámetros biológicos de forma autónoma e indefinida. Debido a que el movimiento del cuerpo al momento de caminar genera las gradientes de las temperaturas entre el cuerpo y el ambiente son fuentes que tienen la posibilidad de tener la suficiente energía para poder incorporar los biosensores. [12]

Los recolectores de energía todavía se encuentran en una etapa inicial de madurez tecnológica, sin embargo, este tipo de sistema es muy prometedor cuando se trata de

alimentar, como por ejemplo los dispositivos de bajo consumo, ya que por su aplicación pueden funcionar de forma inalámbrica. Las comunicaciones inalámbricas descartan la necesidad de utilizar cables para el funcionamiento del equipo, de modo que la energía debe llegar de alguna u otra forma, de este modo los recolectores de energía o el Energy Harvesting pueden llegar alimentar sistemas con consumos relativamente importantes, sin la necesidad de utilizar cables para que llegue la energía. [13]

Unos de los componentes importantes de la tecnología básica del Energy Harvesting es el circuito de interfaz, en la cual el circuito extrae la toda la cantidad posible de energía de un transductor y esta hace que la energía sea adecuada para su aprovechamiento y su posible utilización acondicionándola de forma adecuada para su posible aplicación. Uno de los tipos de recolección de energía es muy utilizada e investigada, la baldosa piezoeléctrica que son pavimentos revestidos con materiales o cerámicas piezoeléctricas que pueden convertir la energía cinética o la energía mecánica de los peatones en energía eléctrica que es aprovechable para poder utilizar como una alimentación en cualquier tipo de aplicaciones como por ejemplo las pantallas y sistemas de venta de entradas. [14]

## 2.3. Métodos de recolección de energía

El almacenamiento de energía hace referencia a la captación de energía que se encuentra presente en el medio ambiente para transformarlo en energía eléctrica. La mayoría de las ocasiones la energía del medio ambiente se desaprovecha o se disipa en el medio. Cabe recalcar que existen varios tipos de almacenamiento de energía, donde se tendrá un enfoque fundamental en la energía cinética. A continuación, se presenta los diferentes métodos de almacenamiento de energía piezoeléctrica. [15]

### 2.3.1. Método piezoeléctrico

Uno de los métodos fundamentales para la recolección de energía es la conversión piezoeléctrica, ya que presenta una estructura funcional sencilla y fácil de integrar en entornos diversos. En la Fig. 2 se puede observar la estructura piezoeléctrica, fundamentalmente se enfocan en vibraciones presentes en el medio ambiente. [16]

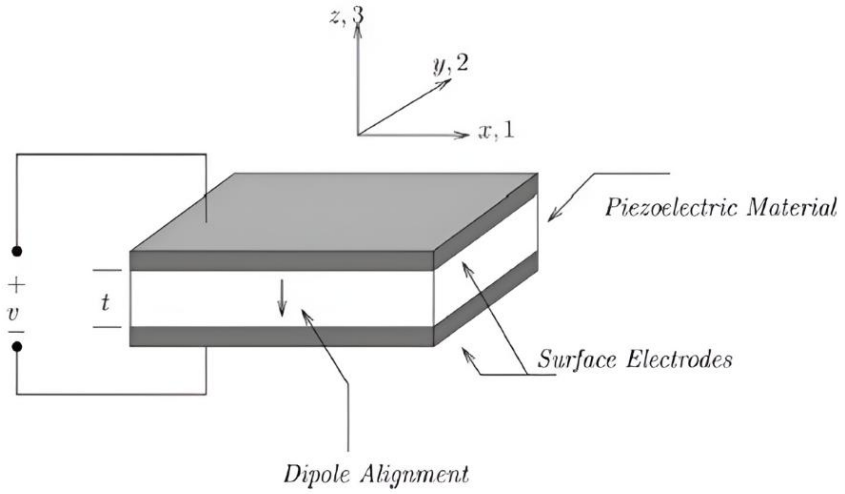



**Fig. 2.** Esquema de un piezoeléctrico. **[15]**

### 2.3.2. Método electrostático

Este tipo de método genera energía a pequeña escala. Se produce por medio del movimiento entre dos superficies de un capacitor, creando un aumento de potencia del capacitor, entregando electricidad estática. Puede ser configurada de dos distintas formas, basadas en carga y voltajes constantes, para el caso de la configuración para un voltaje constante se debe oponer a la fuerza electrostática entre superficies para la variación de energía como se puede observas en la Fig. 3. [16]

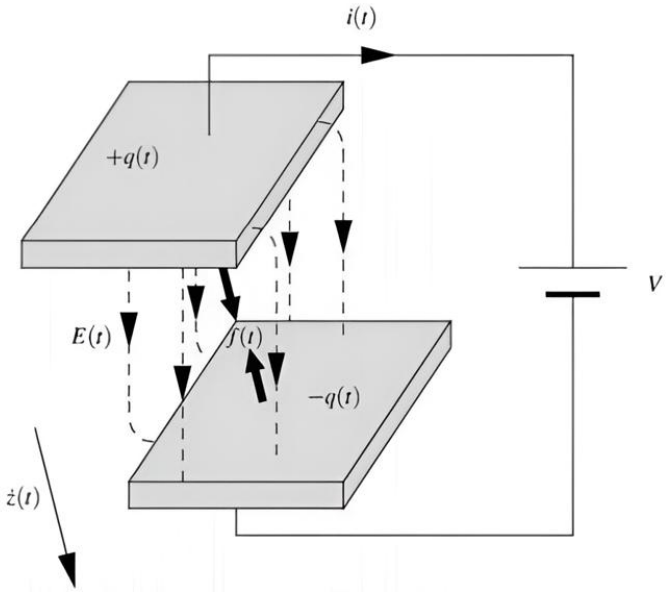



**Fig. 3.** Principio de funcionamiento del recolector electrostático**. [16]**

### 2.3.3. Método electromagnético

Es uno de las más utilizados y conocidos por su alta eficacia y gran potencia de salida, fundamentalmente se enfocan en los principios electromagnéticos. Debido a esto son capaces de recolectar o captar potencias desde los micro - watts (µW) hasta los kilowatts (kW), sin embargo, depende del tamaño. [15]

## 2.4. Aprovechamiento de los recolectores de energía

Los recolectores de energía o Energy Harvesting es la que capta la energía del medio ambiente, en todas las posibles transformaciones de energía existe una pérdida de energía, por lo que la energía que se pierde ya no puede ser aprovechada, debido a esto utilizando el sistema de los recolectores energía se busca aprovechar la energía que se disipa para poder generar una energía utilizable en la vida diaria. Existen dos tipos fundamentales para aprovechar dicha energía: El aprovechamiento térmico y aprovechamiento eléctrico. Este último tipo de aprovechamiento es en la que se tendrá un enfoque fundamental. [17]

### 2.4.1. Aprovechamiento eléctrico

El aprovechamiento eléctrico destacado en este punto es el aprovechamiento de la energía residual de la vida diaria para el autoabastecimiento energético. Hay diferentes métodos para la recolección de la energía residual, estas varían dependiente según la fuente de la energía que se quiera recolectar. Sin embargo, uno de los métodos para poder extraer dicha energía que tiene importancia en este apartado son las vibraciones derivadas del trabajo de maquinarias o también el paso de las personas. [17]

#### 2.4.1.1. Sistemas de vibraciones y energía mecánica

Existen tecnologías que han desarrollado pavimentos para poder aprovechar la energía mecánica como los pasos de las personas, trenes o automóviles para poder generar energía eléctrica. Este tipo de tecnología todavía está un poco desarrollada, de modo que en la actualidad existen empresas que han puesto en práctica unos tipos de suelos que puedan aprovechar la energía mecánica para poder convertirla en energía eléctrica, ya que aprovechan la energía que es generada por la vibraciones o movimiento mecánicos. Este tipo de sistemas es una forma de energía renovable y limpia que puede ser utilizada en

distintas aplicaciones, como por ejemplo como la generación de energía en edificios, fuente de alimentación para sensores y dispositivos electrónicos de bajo consumo. [18]

## 2.5. El efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno descubierto por los hermanos Jacques y Pierre Curie en 1880, la cual la palabra en griego “piezo” significa presión, de modo que el efecto piezoeléctrico se presenta al momento que se aplica presión, y esta genera energía eléctrica, el efecto piezoeléctrico es una propiedad única que se presenta en ciertos cristales que generan una corriente al momento que son sometidos a un esfuerzo mecánico o deformación en la estructura de dicho material. Algunas estructuras cristalinas tienen polarización tanto como positiva como negativa, en la cual se neutraliza a lo largo del eje polar imaginario. Al momento que el equilibrio de carga perturba con una tensión externa sobre la malla de cristal, la energía es transferida creando una corriente eléctrica en el material piezoeléctrico. La relación es directamente proporcional entre la piezoelectricidad y la simetría cristalina. [19]

El efecto piezoeléctrico se puede observar en los cristales sin un centro de simetría, ya que la relación que existe se puede explicar con unas estructuras monocristalinas y policristalinas. En una estructura monocristalina como se puede observar en la Fig. 4 los ejes polares de los portadores que tienen una carga eléctrica que muestran direcciones unidireccionales, de modo que en este tipo de cristales existen simetría, donde los ejes polares al largo del cristal son unidireccionales aun incluso si se lo dividiera en varios trozos. [19]

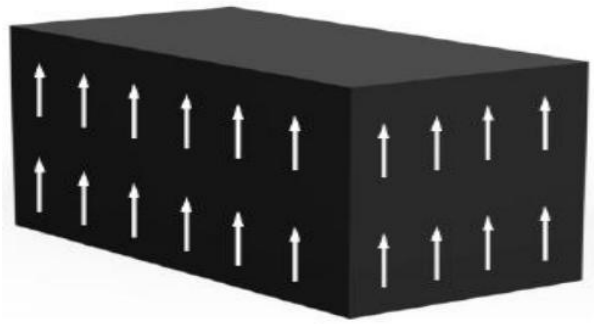


**Fig. 4.** Monocristal. **[19]**

En la Fig. 5 se puede observar un policristal, la cual se diferencia por tener distintas regiones dentro del material policristalino con diferentes ejes polares. Es asimétrico por que no existe ningún punto en el que se pueda cortar el cristal y que las dos piezas restantes tengan los mismos ejes resultantes. Para que se dé el efecto piezoeléctrico, el policristal se calienta hasta llegar al punto de Curie junto con una gran cantidad de campo eléctrico, ya que el calor da paso a que las moléculas se mueven de forma libre y el campo eléctrico obligará a los dipolos a reorganizarse de acuerdo con el campo externo. [19]

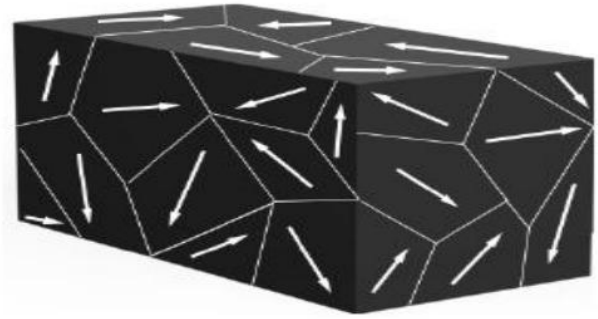


**Fig. 5.** Policristal. **[19]**

El efecto piezoeléctrico en sí se caracteriza por la propiedad que tienen determinados sólidos para generar energía eléctrica al momento que exista una tensión mecánica. La fuerza mecánica aplicada altera la estructura microscópica del cuerpo, donde se crean dipolos en los que se acumulan la tensión, del mismo modo es posible realizar una inversión al momento que se aplica una tensión, los materiales piezoeléctricos son deformados elásticamente, en la cual uno de los materiales piezoeléctricos más distinguidos es el cristal de cuarzo. [20]

Dependiendo de la dirección en que la fuerza mecánica es aplicada o la posición relativa de los ejes polares de cristal, el efecto piezoeléctrico se puede producir longitudinalmente con respecto en la dirección de la fuerza, transversalmente o de forma diagonal como un efecto de tijera como se puede observar en la Fig. 6. Las cargas eléctricas que son producidas en el cristal de cuarzo son directamente proporcionales a la fuerza mecánica que se aplica, los cristales de cuarzo a diferencia de otros materiales piezoeléctricos son resistentes a las fluctuaciones de temperatura. [20]

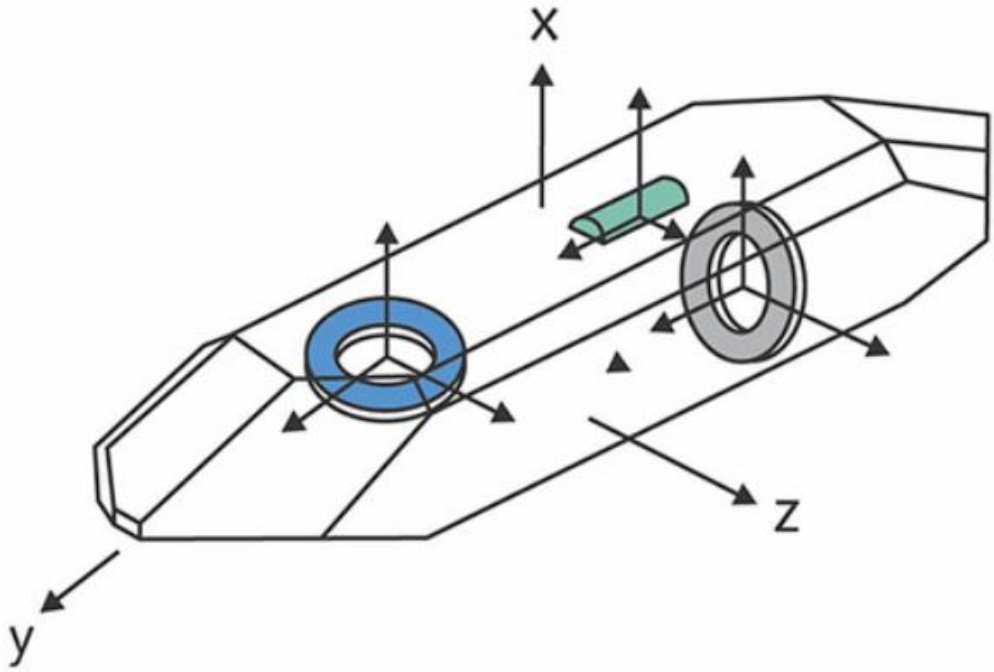



**Fig. 6.** Efecto piezoeléctrico de forma longitudinal, transversal y/o diagonal. **[20]**

### 2.5.1. Generadores piezoeléctricos

Hoy en día existen diversas fuentes generadoras de energía para poder disminuir la contaminación y agotamiento de recursos, una de las energías alternativas más llamativas para poder generar energía eléctrica son los generadores piezoeléctricos las cuales transforman la energía cinética de las cargas que son aplicadas en los generadores piezoeléctricos en energía eléctrica para poder aprovechar y poder ser utilizado en una posible aplicación. Este tipo de tecnologías son mayormente aplicados en baldosas de piso, vías de circulación en edificios y también son aplicables en ferroviarias, de ahí para el aprovechamiento de la energía de los generadores piezoeléctricos como una alternativa sostenible de energía eléctrica. [21]

Un generador piezoeléctrico es una cerámica piezoeléctrica que convierte la energía o tensión mecánicas aplicada en energía eléctrica, ya que a diferencia de un sensor o algún otro tipo de dispositivos piezoeléctricos que pueden convertir la energía cinética a energía eléctrica, los generadores son diseñados para convertir la mayor cantidad de energía posible. [22]

Los generadores piezoeléctricos son fuentes AC por lo que, la salida debe ser rectificada y ser regulada antes de poder alimentar a los dispositivos electrónicos o para poder ser almacenada. Para poder rectificar la señal en corriente alterna a corriente continua que pueda ser aprovechable se utiliza un puente rectificador de diodos de onda completa. [22]

El diseño de un generador es fundamental para que realicen las conversiones correspondientes. La configuración que es elegida para el generador es de suma importancia, de igual forma el tipo de material piezoeléctrico. También es necesario tener en cuenta la fuerza que va a ser sometida el generador de los sensores piezoeléctricos, así mismo la impedancia de la carga. [23]

### 2.5.2. Funcionamiento de los generadores piezoeléctricos

El funcionamiento de los generadores piezoeléctricos es sencillo de comprender, ya que funciona mediante el efecto piezoeléctrico, debido a que capta la energía mecánica del movimiento y la convierte en energía eléctrica, en otras palabras el generador piezoeléctrico las cuales están constituidas por materiales piezoeléctricos en sí, tienden a generar diferencias de potencial al momento que son sometidas a esfuerzos mecánicos, de modo que al momento que se compacta o se estiran dicho material, esta genera una diferencia de potencial leve, como cualquier otro tipo de corriente eléctrica, esta energía que es generada mediante un generador piezoeléctrico es aprovechable, sin embargo, la cantidad de energía que puede ser utilizable es muy limitada, puesto que para aprovechar esta energía de forma eficaz es necesario colocar varios generadores piezoeléctricos en lugares donde exista bastante tránsito peatonal, de tal forma que la energía recolectada con este tipo de sistema se puede consumir cerca del punto de generación, como por ejemplo se podría alimentar la corriente para la carga de los equipos de dispositivos móviles como los celulares. [24]

Como se puede observar en la Fig. 7, al momento que el cristal de cuarzo cortado de forma adecuado se estira o sufre algún tipo de deformación, aparecen cargas en las caras perpendiculares en dirección a la fuerza. Estos tipos de cargas que se presentan en la superficie estimulan, a su vez, cargas en las armaduras para que posteriormente las recubra y al momento que aumenta el valor de la fuerza aplicada también aumenta la

carga cautiva en las láminas laterales, y del mismo modo al momento que la fuerza aplicada disminuye esta libera una parte de la carga cautiva. [25]

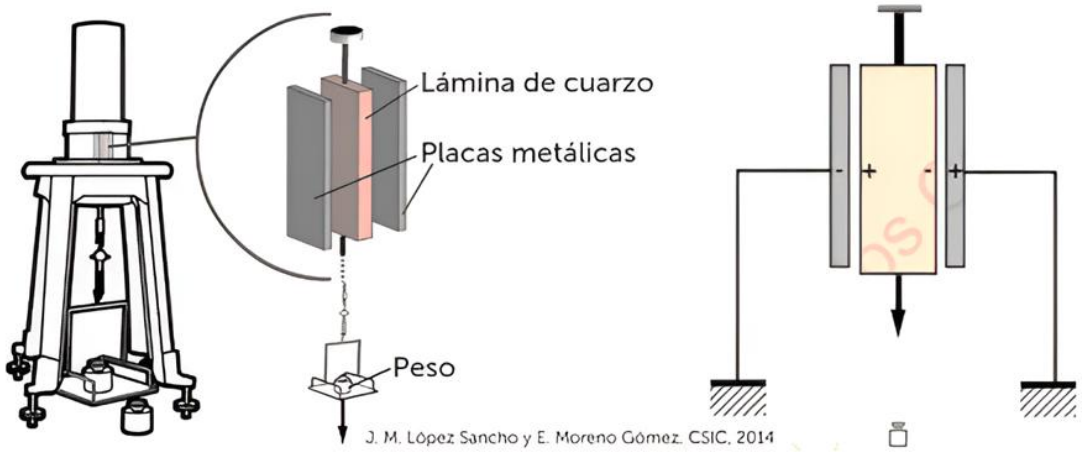



**Fig.7.** Funcionamiento de un generador piezoeléctrico. **[25]**

## 2.6. Materiales piezoeléctricos

Son materiales que no tienen un centro de simetría a nivel molecular, de tal forma que se polarizan al momento que se deforman o al aplicar una fuerza mecánica. Esto se debe al desplazamiento de las cargas internas, este tipo de materiales se pueden dividir en dos principales tipos: materiales piezoeléctricos naturales que son los que se presentan el efecto piezoeléctrico sin la necesidad de tener que adaptarlos o modificarlos y los materiales piezoeléctricos artificiales, la cual es necesario que sea configurado para que puedan presentar el efecto piezoeléctrico, en la TABLA I se presentan los materiales piezoeléctricos más comunes de cada tipo. [10]

**TABLA I**

**MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS MÁS COMUNES**

| Naturales | Sintéticos |
|---|---|
| Cuarzo | PZT (Titanato de circonato de plomo) |
| Sal de Rochelle | PVDF (Polímero de fluoruro de poli vinilideno) |
| Turmalina | |
| Topacio | Titanato de bario |
| Sacarosa | Óxido de Zinc |

En el momento que existe la deformación en los materiales piezoeléctricos existe una leve deformación de un dipolo y ya que se da en toda la estructura del solido se suma todos los pequeños dipolos llegando a generar una pequeña generación de electricidad, de modo que la dirección dependerá de la aplicación de la fuerza excitante. [19]

### 2.6.1. Materiales piezoeléctricos naturales

Este tipo de cristales es un grupo conformado por materiales que presentan las propiedades o el efecto piezoeléctrico de manera natural, de modo que no es necesario ser configurado, este tipo de materiales se encuentran en forma de minerales o cristales en la naturaleza. Una de las principales ventajas que tiene los materiales piezoeléctricos naturales es que las propiedades no pueden ser cambiadas en función del tiempo, sin embargo, son materiales que muestran un bajo efecto piezoeléctrico, de modo que son poco utilizados para algunas aplicaciones como Energy Harvesting. [26]

### 2.6.2. Materiales piezoeléctricos sintéticos

Los materiales piezoeléctricos sintéticos son conocidos como materiales ferroeléctricos, sin embargo, es necesario que estos materiales sean sometidos a una configuración previa para su polarización con el fin de aumentar sus propiedades piezoeléctricas. Los materiales piezoeléctricos sintéticos están divididos en cuatro grupos según las características estructurales: materiales monocristalinos, cerámicas policristalinas, polímeros y compuestos. [26]

Al ser configurados y tener una fuerte polarización en las estructuras cristalinas, las cerámicas policristalinas o los materiales monocristalinos muestran propiedades piezoeléctricas mejoradas, sin embargo, estos materiales son mucho más rígidos y frágiles ante grandes tensiones mecánicas, de modo que los hace inapropiados para algunas aplicaciones. Para la selección de materiales piezoeléctricos para aplicar a los recolectores de energía o Energy Harvesting no solamente dependen de las propiedades piezoeléctricas del material, también influyen las condiciones de diseño que impone el mismo sistema, por ejemplo: la frecuencia de la aplicación, las máximas dimensiones de la estructura, la forma en la que la energía mecánica alimentara al sistema, entre otras. [26]

### 2.6.3. Eficiencia de la tecnología piezoeléctrica

A continuación, con el objetivo principal de demostrar las mejores características de los materiales piezoeléctricos, en la TABLA II se detalla algunos aspectos que se deben tomar en cuenta al momento de seleccionar e implementar en algún sistema ya sea un prototipo o un sistema de generación sustentable. [27]

**TABLA II**

**EFICIENCIA DE LA TECNOLOGÍA PIEZOELÉCTRICA**

| Tecnología | Eficiencia (%) | Características | Referencias |
|---|---|---|---|
| **Piezoeléctrica** | La eficiencia que tiene al momento de convertir energía mecánica a energía eléctrica es de un 25% a 50 % de generación. | > Aprovecha el mayor número de efectos físicos para generar energía eléctrica, como, por ejemplo: en las carreteras, suela de zapatos, baldosas, etc. | [27] |
| | | > Con una alta rigidez pueden soportar campos eléctricos elevados, de modo que permite generar energía eléctrica a partir de la energía mecánica. | [26] |
| | | > Eficiencia en generar, debido a que permite la transferencia de energía más eficientemente a través del material piezoeléctrico. | [28] |
| | | > Con bajas perdidas mecánicas son más eficientes en la generación de energía eléctrica a partir de la energía mecánica. | [10] |

## 2.7. Aplicaciones de la energía piezoeléctrica

Gracias al avance tecnológico para el uso eficiente de la energía, este tipo de energía a partir de materiales piezoeléctricos son utilizados ampliamente para distintas aplicaciones, especialmente desde el descubrimiento de los materiales piezoeléctricos sintéticos, se aprovechan en diversos campos la energía piezoeléctrica. [10]

El efecto piezoeléctrico es el que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, dilatación, entre otros, en una señal eléctrica. De modo que para aprovechar la energía piezoeléctrica se usan sensores, actuadores y sistemas que necesiten interactuar con diferentes tipos de señales. El transductor piezoeléctrico se aplica en el uso cotidiano como es el caso de un mechero o encendedor, ya que se encienden con un pequeño arco, en este caso el dispositivo funciona como actuador, ya que se aplica una fuerza mecánica sobre una palanca, que a su vez presiona un material piezoeléctrico, de modo que se presenta una chispa sobre el gas que expulsa el propio mechero y lo enciende. [10]

Algunos teclados se benefician del impulso eléctrico que es generado mediante un transductor piezoeléctrico, normalmente presentan excelentes condiciones para aplicaciones industriales, médicos o de exterior, existen varias investigaciones de teclados para que sean capaces de generar una parte de la energía consumida por un dispositivo con el reaprovechamiento de la energía que es utilizada al momento de escribir. [10]

Los dispositivos de uso cotidiano como los micrófonos y auriculares o altavoces es una aplicación más de los materiales piezoeléctricos para aprovechar la energía generada, ya que en este caso las ondas eléctricas son transformadas en vibraciones y seguidamente en sonido. Algunas impresoras usan actuadores piezoeléctricos como eyectores de tinta, de modo que el cabezal se encuentra montado sobre la impresora disminuyendo los costes de cartuchos. [10]

En las industrias automotrices cuentan con inyectores de combustibles utilizando la energía piezoeléctricos, de modo que sustituyen a las bobinas obteniendo una mayor precisión y velocidad de actuación, también en los airbags que tienen los vehículos utilizan el efecto piezoeléctrico como sensor de impacto activando el inflado de la bolsa. Los sensores de vibración también tiene aplicaciones industriales, aplicaciones en

motores piezoeléctricos, usos en medicina que principalmente son utilizados en aparatos de diagnóstico, entre otras, son pocos ejemplos en los que se aplican los materiales piezoeléctricos, gracias a las grandes funcionalidades que proporcionan los materiales piezoeléctricos, en los últimos años el uso de estos dispositivos ha ido en aumento en muchos ámbitos, generalmente la madurez tecnológica son utilizados en dispositivos de baja potencia como sensores o actuadores. Esta innovación ha llevado un desarrollo constante en los últimos años para otro tipo de aplicaciones de los materiales piezoeléctricos, las más fundamental es la generación de energía eléctrica, si un dispositivo pequeño al cual es sometido una pequeña fuerza y genera una pequeña carga, esta pueda ser amplificada aplicando mayores cargas o instalando más dispositivos o haciéndoles de mayor tamaño. [10]

La necesidad que tiene el ser humano de generar energía de forma sostenible y sustentable, disminuyendo el uso de las fuentes no renovables ha llevado al descubrimiento de nuevas formas de producir energía a partir de fuentes renovables. La energía que es generada debe captar la energía que se encuentra en la naturaleza, como el viento, luz solar, calor, mareas, entre otras y poder transformarlas para que pueda ser utilizado. La energía eólica que genera energía a partir de molinos, la energía solar como la fotovoltaica o térmica y la energía hidráulica son algunos ejemplos de la energía renovable, algunas de estas energías renovables tienen una madurez tecnológica y otras están en proceso de crecimiento. Sin embargo, existen otras fuentes de energía que no se estaban utilizando y conlleva a un amplio campo de estudio para su posible desarrollo como, por ejemplo, las vibraciones que son producidas por el viento o las olas del mar y el aprovechamiento de la fuerza mecánica de los peatones. [10]

En la TABLA III se presentan las principales aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas, las pueden ser empleadas en diversas áreas dentro del ámbito tecnológico. Estos materiales se clasifican generalmente en cuatro categorías funcionales: sensores, actuadores, transductores y acelerómetros. Cada una de estas categorías representa un campo de aplicación especifico, en el que las propiedades piezoeléctricas de los materiales cerámicos resultan fundamentales para el desarrollo de los dispositivos eficientes de alta precisión.

TABLA III

APLICACIONES DE LAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS

| Dispositivos piezoeléctricos | Características | Referencias |
|---|---|---|
| **Sensores** | > Es un dispositivo que permite medir variaciones de presión, aceleración, temperatura, tensión o fuerza mecánica para transformarlo en energía eléctrica, dicho fenómeno se denomina efecto piezoeléctrico, la piezoelectricidad es directamente proporcional a la presión que se aplica sobre el dispositivo.<br>> Los principales elementos de los sensores son los cerámicos piezoeléctrico y los materiales monocristalinos, ya que la sensibilidad de las cerámicas piezoeléctricos es mucho mayor que los monocristales naturales. | [29] |
| **Actuadores** | > Los actuadores piezoeléctricos son dispositivos que utilizan el efecto piezoeléctrico inverso, teniendo una respuesta a una tensión que fue aplicada externamente, ofrece una alternativa viable a los elementos electromagnéticos.<br>> Son aplicados en diversos campos de la industria como la medicina, la aviación, el espacio, entre otras. Son comúnmente utilizados en los lentes y enfoque automático en cámaras y teléfonos móviles debido a su funcionamiento silencioso. | [30]<br>[31] |
| **Transductores** | > Los transductores envían y reciben ondas para diferentes tipos de detección como la distancia, | [32]<br>[31] |

proximidad, nivel, evaluación no destructiva, detección de rotura de banda, entre otras.

> Un transductor piezoeléctrico es un transductor electroacústico que transforma la energía eléctrica que es producida por las cerámicas piezoeléctricas en algún otro tipo de energía.

> Los transductores o como se les denomina convertidores son utilizados en varias aplicaciones como, por ejemplo: en automotriz, en los domicilios, aplicaciones industriales, electrónica, entre otras.

**Acelerómetros**

> Los acelerómetros piezoeléctricos son utilizados para realizar pruebas de vibración y choque, debido a que estos dispositivos son muy eficaces para medir las señales de la aceleración de alta frecuencia que se encuentran en perturbaciones hidráulicas y neumáticas, las fuerzas de impulso o también conocidos como fuerza de impacto, vibraciones de maquinarias, entre otros.

> En la estructura de los acelerómetros piezoeléctricos consta de un material piezoeléctrico para poder conectar una cantidad determinada de masa, generalmente se le conoce como masa de prueba al cuerpo del acelerómetro [33] [34]

> De igual forma que los otros transductores, los acelerómetros piezoeléctricos pueden convertir una forma de energía a otra y llegan a proporcionar una señal eléctrica en respuesta a la condición, cantidad o propiedad.

## 2.8. Almacenamiento de la energía piezoeléctrica generada

El efecto piezoeléctrico transforma la energía cinética de las pisadas humanas a energía mecánica y posteriormente a energía eléctrica en corriente alterna (AC), dicho esto los dispositivos de Energy Harvesting convierte la energía AC (Corriente alterna) a DC (Corriente continua) para almacenar o acondicionar para su utilización. Debido a que la generación de energía piezoeléctrica no es constante para alimentar cargas o ser una fuente de alimentación eficaz, es necesario el almacenamiento de la energía para aprovecharla en el momento que se requiera. [10]

Las baterías son usadas generalmente como almacenadores de energía generada, de modo que se puede almacenar la energía generada a partir de los materiales piezoeléctrico, ya que nos permiten guardar la energía generada para posteriormente utilizarla dependiendo del nivel de consumo, lo que impide que la potencia generada por los dispositivos piezoeléctricos se pierda instantáneamente, la funcionalidad y eficacia de la baterías dependen del tipo de material de construcción, la temperatura en la que se encuentre trabajando y el estado de descarga que tenga. [35]

Para la selección de la batería más eficaz para el almacenamiento de energía piezoeléctrica se debe tener en cuenta las baterías comerciales que se encuentren presente en el mercado, están son principalmente realizadas a base de plomo, las baterías liquidas, también hoy en la actualidad mayormente se puede encontrar baterías de litio, estas dependen de la cantidad de energía que se quiera almacenar y consecuente utilizarla. [35]

La energía generada a partir de los materiales piezoeléctricos debe ser almacenada, ya que el sistema piezoeléctrico puede tener variaciones de carga o la energía piezoeléctrica generada no es suficiente para ser una fuente de energía para la mayoría de los aparatos electrónicos. La energía que es generada puede ser almacenada en algún tipo de elemento de almacenamiento. Se conocen distintos tipos de tecnologías para almacenar energía como por ejemplo los capacitores de alta densidad de energía de carbón – plomo, super capacitores, almacenamiento de energía por aire comprimido y baterías. Para el sistema de carga y almacenamiento se basará en esta última tecnología. [36]

### 2.8.1. Tipos de baterías o acumulador de energía

En la actualidad en el mercado existen diferentes tipos de baterías, en la Fig. 8 se muestra una imagen de las baterías más comunes.

**Fig. 8.** Tipos de baterías

**[36]**

Para el almacenamiento de energía existentes diversos métodos, sin embargo, las baterías cuentan con ventajas como por ejemplo su tamaño compacto o portabilidad, se pueden adquirir fácilmente y son económicas, lo cual los hace una mejor opción para realizar una implementación de un sistema de almacenamiento de energía. Como ya se mencionó anteriormente existen distintos tipos de baterías, en la **TABLA IV** se puede observar las más importantes, se diferencian en la estructura física, el funcionamiento o su composición química, de igual forma tienen sus ventajes y desventajas. [36]

**TABLA IV**

**TIPOS DE BATERÍAS MÁS IMPORTANTES**

| Tipo de batería | Características | Referencias |
|---|---|---|
| **Baterías de plomo ácido** | > Estas baterías es un tipo de batería primaria, hoy en día es la tecnología de acumulador de energía más antigua, sin embargo, todavía siguen siendo un método | [36] |

| | | |
|---|---|---|
| | de almacenamiento recargable más utilizado en pequeños sistemas de respaldo. | |
| **Baterías de Níquel – Cadmio (NiCd)** | > Es una batería de tipo alcalina, el material del electrodo positivo es hidróxido de Níquel Ni(OH)2, por otro lado, el Cadmio (Cd) es el electrodo negativo.<br>> El hidróxido de potasio (KOH) es la solución alcalina que se comporta como el electrolito.<br>> Según su aplicación se puede encontrar en forma sellada para dispositivos portátiles o tipo húmedo para aplicaciones industriales. | [36] |
| **Baterías de litio** | > La primera batería de este tipo de se basaba en un cátodo de di – sulfato de titanio (TiS2) y un ánodo de litio – aluminio (LiAl).<br>> Desde su comercialización las baterías de litio lograron desarrollar avances significativos con relación a su peso, capacidad de almacenamiento y potencia. Hoy en día estas baterías son utilizadas ampliamente en dispositivos móviles y aparatos electrónicos. | [36]<br>[37] |

Para el almacenamiento de la energía piezoeléctrica generada en las baterías de iones de litios se tendrá un enfoque e importancia por su alta eficiencia, el suministro de potencia que se regula depende según la energía y potencia especificada a utilizar.

Las baterías son consideradas como elementos de almacenamiento de energía generada, es un elemento que utiliza como electrolito una sal de litio que obtiene los iones requeridos para una reacción electroquímica reversible, la cual tiene lugar en el cátodo y ánodo. [38]

Las características de las baterías de Li – ion, como su ligera estructura, la elevada capacidad energética y la resistencia de descarga, la capacidad de eficiencia junto con un elevado ciclo de regeneración, han dado paso para desarrollar acumuladores ligeros, un tamaño pequeño y diversas formas con un alto porcentaje de rendimiento, este tipo de baterías con particularmente diseñados para las aplicaciones electrónicas.

Desde la aparición de una batería o acumulador de energía con tecnología que se basa en Li – ion se ha comercializado de gran manera que hasta el día de hoy se utilizan en los teléfonos móviles, agendas electrónicas y lectores de músicas. Por otro lado, el desgaste y sensibilidad ante la presencia de elevadas temperaturas pueden ocasionar una destrucción por inflamación o incluso explosión. [38]

Como se puede observar en la Fig. 9, para el almacenamiento de energía piezoeléctrica debe pasar por diferentes etapas, por ejemplo, el tipo de fuente que se utilizó para la obtención de energía, acondicionamiento de la energía piezoeléctrica generada y el almacenamiento de la energía en baterías para posteriormente aprovechar la energía. [39]

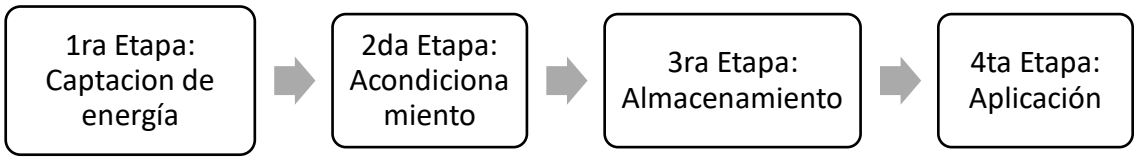



**Fig. 9**. Etapas para el almacenamiento y aplicación de la energía piezoeléctrica
**[39]**

# CAPÍTULO III

# MÉTODOS Y MATERIALES

En el presente capítulo se describen los métodos y herramientas de investigación empleados para el desarrollo del trabajo de integración curricular. Asimismo, se proporciona información destallada sobre los materiales y los softwares utilizados en las etapas de diseño, construcción e implementación del sistema piezoeléctrico y del circuito de control de carga, cuyo propósito es la captación y aprovechamiento de la energía generada mediante materiales piezoeléctricos.

## 3.1. Descripción de la metodología

Para el desarrollo del marco teórico se aplicó la metodología de investigación bibliográfica, orientada al análisis cuantitativo de los sistemas de generación y almacenamiento de energía basados en materiales piezoeléctricos. Esta metodología facilitó la recopilación de información relevante proveniente de fuentes académicas confiables, constituyendo un sustento teórico sólido para la presente investigación. Se revisaron publicaciones científicas indexadas, artículos técnicos, proyectos de grado y documentos disponibles en plataformas especializadas, como el sitio web de la IEEE, seleccionadas bajo criterios de confiabilidad, actualidad y pertenencia, con énfasis en estudios que abordarán las propiedades piezoeléctricas, los métodos de recolección de energía y sus aplicaciones en sistemas de carga. Este proceso permitió la elaboración de una descripción detallada y fundamentada de este tema de investigación.

La metodología documental permitió realizar una revisión exhaustiva de la información recopilada, a partir de la cual se llevó a cabo un análisis detallado del tema de estudio. Este proceso posibilitó el establecimiento de una base teórica sólida para el diseño y construcción del prototipo, asegurando la pertinencia y validez de los fundamentos conceptuales empleados. En esta etapa de la investigación, el objetivo fue proporcionar una visión global sobre las ventajas y desventajas de un sistema de carga basado en la generación de energía eléctrica mediante materiales piezoeléctricos, orientado a la carga de la batería de un teléfono celular.

De forma complementaria, se aplicó un enfoque cuantitativo, en el cual se utilizaron ecuaciones y modelos matemáticos para determinar los parámetros eléctricos y mecánicos

del sistema piezoeléctrico. La simulación computacional desempeñó un papel fundamental al incorporar modelados matemáticos y flujogramas, permitiendo un análisis detallado de dichos los parámetros. Este enfoque facilitó la comprensión profunda del comportamiento del sistema piezoeléctrico, contribuyendo significativamente al desarrollo y optimización del diseño.

La implementación del prototipo se llevó a cabo mediante el método experimental, lo cual permitió diseñar, desarrollar y aplicar un sistema de carga basado en energía piezoeléctrica. Esta metodología resultó fundamental para la ejecución de pruebas y evaluaciones técnicas destinadas a analizar el desempeño y la funcionalidad del prototipo. Se obtuvieron datos relevantes relacionados con la duración de carga, el peso de la persona, el tiempo de descarga y la presión aplicada sobre el material PZT. Las pruebas experimentales incluyeron mediciones de voltaje, corriente y potencia bajo diferentes condiciones, tales como variaciones en el peso del usuario y la cantidad de pasos realizados. Estas pruebas tuvieron como objetivo evaluar la efectividad y desempeño del sistema en términos de generación y almacenamiento de energía.

### 3.1.1. Alcance de la investigación

El objetivo principal de este trabajo de grado es desarrollar y presentar un prototipo de un sistema de carga para aprovechar la energía piezoeléctrica. Este sistema está diseñado para convertir la presión o tensión mecánica en energía eléctrica, almacenarla y, posteriormente, utilizarla para cargar la batería de un celular, proporcionando una mayor durabilidad de carga, es decir, que se extienda ligeramente la autonomía de la batería del dispositivo móvil. La investigación se centró en una tecnología en específica: los cerámicos piezoeléctricos. Para ello, se utilizó un enfoque exploratorio destinado a obtener una perspectiva general de este tipo de tecnologías, identificando las características generales, principios de funcionamiento y ventajas.

Adicionalmente, a través de un enfoque descriptivo, se llevó a cabo un análisis detallado de las propiedades y el funcionamiento de los materiales piezoeléctricos. Este análisis incluyó la revisión de datos técnicos y eléctricos pertinentes, con el fin de proporcionar una base sólida para comprender las características inherentes a dichos materiales. Asimismo, se abordaron las aplicaciones prácticas y las limitaciones asociadas

a esta tecnología, lo que permitió establecer una visión integral sobre su potencial y alcance en distintos ámbitos de uso.

### 3.2. Procedimiento

Para la realización del trabajo de integración curricular, se presenta la estructura de los pasos seguidos durante su desarrollo, garantizando la congruencia con los objetivos planteados previamente para el desarrollo del prototipo. Se empleó la metodología cuantitativa con el propósito de identificar las técnicas y procesos que permitieron llevar a cabo el trabajo de grado de forma cronológica y ordenada. Esta metodología facilitó la descripción detallada de cada etapa, desde la conceptualización teórica hasta la implementación práctica del sistema.

En cuanto a la población y la muestra, se optó por seleccionar tres sujetos de prueba. Este tamaño de muestra es adecuado para el análisis, ya que permite obtener una visión inicial y controlar las variables experimentales dentro de un marco manejable. Aunque una muestra más grande podría ofrecer una mayor representatividad, la selección de tres participantes es suficiente para este estudio inicial. Según datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) de Ecuador, el peso promedio de los hombres adultos es aproximadamente 69,45 kg, mientras que el de las mujeres adultas es alrededor de 56,90 kg, valores obtenidos a partir de estudios antropométricos que analizan las características físicas de la población ecuatoriana. Además, se seleccionaron sujetos con características físicas diversas para evaluar cómo el peso corporal y la cantidad de pasos influyen en la energía generada. Las mediciones realizadas, como la masa corporal, tuvieron el objetivo de establecer una relación cuantitativa entre las características físicas de los sujetos y el comportamiento del sistema piezoeléctrico.

En la Fig. 10 presenta de manera gráfica el orden y las etapas que se llevó a cabo para el desarrollo del proyecto de investigación, contemplando todas las fases, desde la recopilación y análisis de información preliminar, pasando por el diseño y construcción del prototipo, hasta la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos.

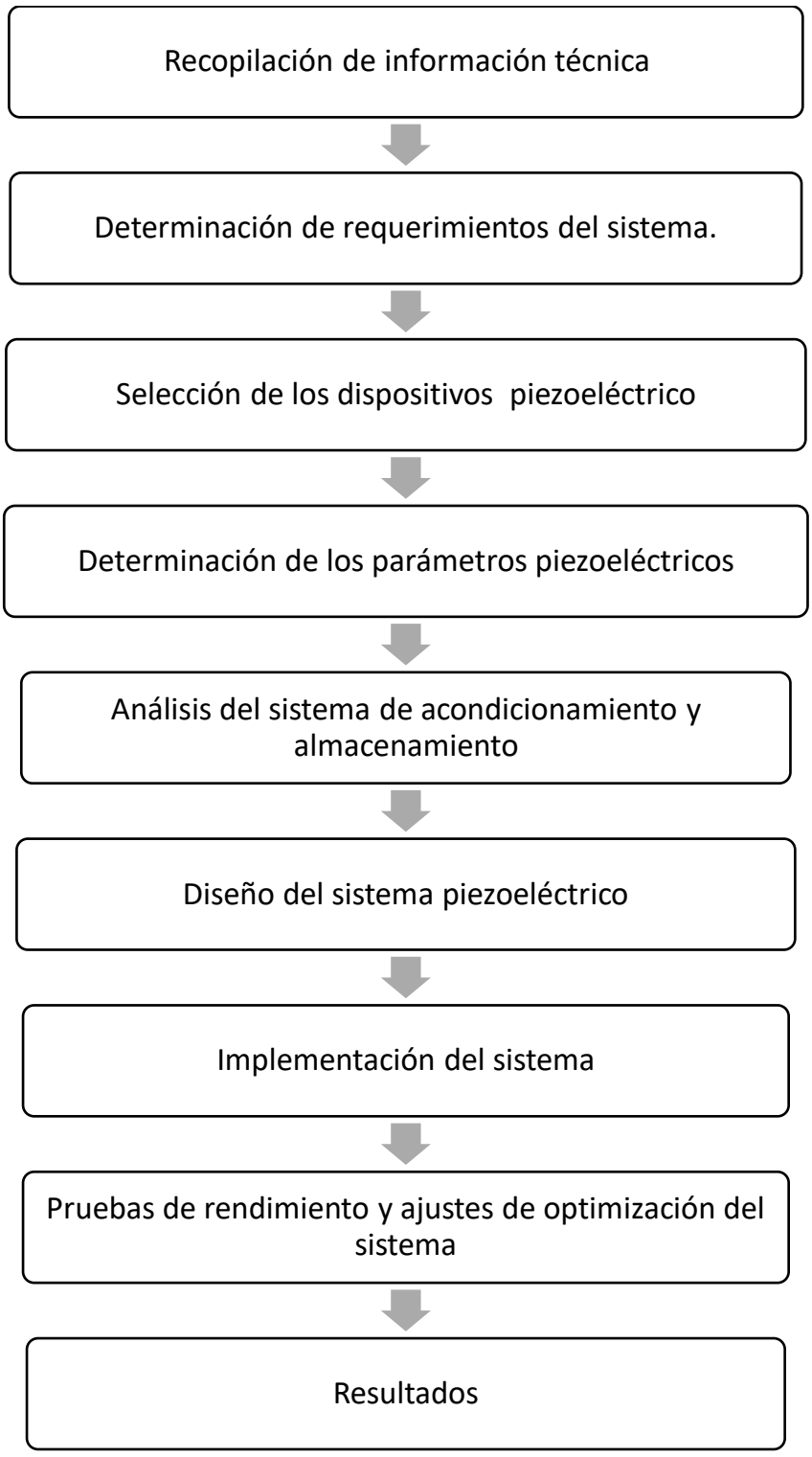



**Fig. 10.** Metodología empleada para el presente trabajo de grado.

En la etapa teórica se realizó una exhaustiva investigación sobre el sistema de carga y generación eléctrica a partir de materiales piezoeléctricos. Para empezar, se realizó un análisis bibliométrico que permitió recabar información relevante y coherente, analizando estudios previos, artículos científicos y documentos relacionados al tema. Esto facilitó una mayor comprensión de los principios de funcionamiento de la tecnología piezoeléctrica.

Además, se realizó una revisión de la literatura científica existente sobre el tema, con el objetivo de utilizar los resultados de estudios previamente realizados sobre la generación, captación, almacenamiento y carga de energía piezoeléctrica como punto de referencia para el análisis y el desarrollo del prototipo planteado.

El desarrollo de los generadores piezoeléctricos tiene como función transformar la energía cinética generada por las pisadas de una persona en energía eléctrica. El objetivo es estudiar la cantidad de energía potencial que se puede generar y extraer de este proceso. Para los resultados del proyecto, es necesario considerar los parámetros fundamentales del material especificado, tales como: el diámetro piezoeléctrico, grado de deformación alcanzada, fuerza que ejerce sobre el material y la resistencia de los materiales piezoeléctricos. Para utilizar el material correcto, es esencial escoger el mejor material para el acoplamiento en la plantilla de un calzado, teniendo en cuenta la consistencia y la deformación bajo cargas dinámicas. Asimismo, al elegir el dispositivo piezoeléctrico, es crucial seleccionar uno que sea eficaz para generar la suficiente energía, para posteriormente ser almacenada en la batería acoplada al sistema de carga.

Para el diseño del generador piezoeléctrico, se deben considerar diversas alternativas para el montaje entre la plantilla y el material piezoeléctrico. Tras un análisis y comparación de las opciones disponibles, se seleccionó el material para cumplir con los requerimientos del trabajo de integración curricular. Una vez finalizado el diseño general del generador se procedió a realizar el diseño detallado con el fin de optimizar la solución y hacerla lo más eficiente posible.

En la fase de implementación, se integraron los elementos piezoeléctricos en las plantillas de calzado, debido a su capacidad de generar una diferencia de potencial al ser sometidos a fuerzas o presiones mecánicas. Para su implementación, los discos

piezoeléctricos fueron ensamblados en una plantilla flexible fabricada mediante impresión 3D. lo que permitió una adecuada distribución y fijación de los componentes. Adicionalmente, se incorporaron sensores piezoeléctricos flexibles en una plantilla ergonómica, con el propósito de optimizar la captación de energía generada durante la marcha. Los discos piezoeléctricos se acoplaron realizando arreglos estratégicos con el objetivo de maximizar la cantidad de energía generada al aplicar presión sobre ellos. Este enfoque de diseño permitió mejorar la eficiencia en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica. Finalmente, se llevaron a cabo diversas pruebas experimentales orientados a optimizar el rendimiento del sistema y validar su funcionamiento en condiciones reales de uso.

Para aprovechar la energía generada por los dispositivos piezoeléctricos, se diseñó un circuito electrónico encargado de regular la tensión. Dicho diseño se realizó utilizando el software Proteus, lo que permitió desarrollar el circuito necesario para el sistema de almacenamiento y carga de energía. Asimismo, se simuló el sistema electrónico mediante el software Matlab/Simulink, facilitando la visualización de la potencia media e instantánea generada durante el movimiento, lo cual es fundamental para evaluar la eficiencia del sistema.

Una vez implementado el sistema de almacenamiento y carga acoplada al generador piezoeléctrico, la señal eléctrica producida por el arreglo piezoeléctrico pasa por la etapa de acondicionamiento, donde se rectificó y reguló antes de ser almacenada en una batería de litio de 3,7 V.

Para evitar los picos de voltaje en la salida, producto de la naturaleza pulsante de la energía generada por los dispositivos piezoeléctricos, la etapa de acondicionamiento cuenta con la regulación de la señal eléctrica obtenida antes de su ingreso al sistema de almacenamiento. Esta regulación fue posible gracias al módulo LTC3588, la cual permitió reducir las variaciones en el voltaje de salida y garantizar el funcionamiento seguro y eficiente del sistema. Así, se logró aprovechar de manera efectiva la energía generada por el arreglo piezoeléctrico bajo condiciones dinámicas de impacto repetido.

Para el almacenamiento de la energía piezoeléctrica, se aprovechó la señal de salida acondicionada por el módulo LTC3588, la cual fue dirigida a una batería de litio de 3,7 V. Este proceso permitió almacenar la energía generada de manera eficiente dentro de las limitaciones del sistema. Sin embargo, se observó que la cantidad de energía cumulada no es suficiente para alimentar un dispositivo móvil de manera continua, debido a la baja potencia de generación piezoeléctrica bajo condiciones de carga dinámica.

Adicionalmente, se realizaron una serie de actividades destinadas a recopilar datos para determinar la cantidad promedio de pasos, analizando su relación con la energía generada. Esto permitió calcular, en función del peso de la persona, el tiempo requerido para cargar la batería recargable de 3,7V. Se analizaron las tensiones generadas al caminar, trotar o correr, y los datos obtenidos se representaron gráficamente mediante Excel para una mejor interpretación de los resultados.

En la etapa final, destinada a la alimentación de la batería de un celular, una vez que la batería de litio recargable completó su carga, se procedió a acoplarla al sistema de carga mediante un conector o cable USB, asegurando así su funcionalidad como fuente de energía para el dispositivo móvil.

## 3.3. Materiales

En este apartado se presenta la descripción de los materiales y herramientas utilizados en el desarrollo del trabajo de integración curricular, los cuales incluyen equipos, software y las ecuaciones necesarias para calcular los parámetros correspondientes.

Para el diseño del prototipo de un sistema carga que aproveche la energía piezoeléctrica (Generación, almacenamiento, carga y descarga de energía), se utilizó un software específico que permitió desarrollar y detallar el modelado del sistema. La implementación del prototipo se fundamentó en la integración de diversos componentes, como los sensores o discos piezoeléctricos, el sistema de carga y almacenamiento, y la estructura que acoplado cada uno de los elementos mencionados.

### 3.3.1. Materiales utilizados para la implementación

En este apartado se describen las características teóricas y especificaciones técnicas de los materiales empleados en la implementación del prototipo de un sistema de carga

diseñado para aprovechar la energía piezoeléctrica, almacenarla y utilizarla posteriormente para cargar la batería de un celular.

### 3.3.1.1. Material piezoeléctrico

El material piezoeléctrico tiene la capacidad de generar cargas eléctricas cuando se le aplica presión, un fenómeno conocido como efecto piezoeléctrico. [40]

Para la implementación del prototipo se utilizó los materiales piezoeléctricos PZT (Titanato de circonato de plomo), un material cerámico piezoeléctrico, en la TABLA V se presenta los detalles técnicos del sensor piezoeléctrico empleado en este proyecto.

**TABLA V**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR PIEZOELÉCTRICO**

| Sensor piezoeléctrico | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Modelo | PZT | - |
| | Capacidad (a 1kHz) | 40.000 | pF |
| | Impedancia (Resonancia) | 500 | Ohmios (Ω) |
| | Frecuencia de resonancia | 2.3 | kHz |
| | Espesor (t) | 1 | mm |
| | Temperatura de operación | 30 – 80 | °C |
| | Diámetro (d) | 27 | mm |
| | Constate de tensión piezoeléctrica | $g_{33} = 2x10^{-3}$ | $\frac{Vm}{N}$ |
| | Constante de carga piezoeléctrica | $d_{33} = 460x10^{-12}$ | $\frac{C}{N}$ |
| | Constante dieléctrica relativa | $\varepsilon^t = 1850$ | - |

### 3.3.1.2. Puente de diodos 2W10

El puente de diodos 2W10 es un rectificador cuya función principal es convertir una señal alterna, que contiene partes positivas y negativas, en una señal completamente positiva. Si bien un diodo simple puede eliminar las partes negativas de la señal, el puente de diodos permite aprovechar tanto la parte positiva como la negativa, mejorando la

eficiencia del proceso. Este dispositivo es un arreglo de los componentes electrónicos que se encuentra presente en la mayoría de las fuentes de voltaje. En conjunto con un condensador y un diodo Zener, el puente de diodos facilita la conversión de corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) para pasar a la etapa del filtrado de voltaje. Las especificaciones técnicas del puente de diodos se detallan en la TABLA VI. [41]

**TABLA VI**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PUENTE DE DIODOS**

| 2W10 | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Modelo | 2W10 | - |
| | Voltaje de pico inverso máximo | 1000 | V |
| | Corriente máximo promedio | 2 | A |
| | Tensión emisor - base | 5 | V |

### 3.3.1.3. Capacitor

Un capacitor es un elemento pasivo cuya función principal es almacenar energía eléctrica. Está compuesto por un material dieléctrico (aislante) que separa dos placas conductoras metálicas. Esta configuración permite que el capacitor acumule carga eléctrica en las placas cuando se aplica una diferencia de potencial. Además de su función principal de almacenamiento, los capacitores también pueden ayudar a regular y retener el flujo de corriente eléctrica en los circuitos, desempeñando un papel crucial en el filtrado y la estabilización de señales eléctricas. Las especificaciones técnicas del capacitor utilizado se presentan en la TABLA VII. [42]

**TABLA VII**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CAPACITOR ELECTROLÍTICO**

| Capacitor electrolítico | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Capacitancia | 220 | µF |
| | Tensión o voltaje | 16 | V |
| | Corriente | 50 | µA |

### 3.3.1.4. Batería de litio

Las baterías de litio recargables se basan en el almacenamiento de energía en forma electroquímica, aprovechando una reacción conocida como inserción. Estas baterías son sistemas que convierten energía química en energía eléctrica, lo que las hace ideales para proporcionar energía útil a un dispositivo móvil. Cada unidad básica de estas baterías se denomina célula electroquímica, y un conjunto de estas células interconectadas forma una batería completa. [43]

Se eligió este tipo de acumulador de energía para la etapa de almacenamiento debido a su alta densidad energética, eficiencia y capacidad de recarga. Las especificaciones técnicas del batería de litio utilizada en este proyecto se detallan en la TABLA VIII.

**TABLA VIII**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE UNA BATERÍA DE IONES DE LITIO DE 3.7 V**

| Batería LI-ION | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Voltaje nominal | 3,7 | V |
| | Voltaje máximo de carga | 4,2 | V |
| | Voltaje mínimo de descarga | 3,2 | V |
| | Capacidad nominal | 2600 | mAh |
| | Corriente de carga | 0,5 | A |
| | Corriente de descarga | 1,5 | A |

### 3.3.1.5. Resistencia

La resistencia es un componente electrónico cuya función principal es oponerse al paso de corriente eléctrica en un circuito, regulando así la cantidad de corriente que pasa a través de él. Esta oposición se mide en ohmios (Ω).

En la implementación del prototipo, las resistencias son esenciales para el control de la corriente en los circuitos eléctricos y para proteger otros componentes del sistema. En la TABLA IX, se detalla los datos fundamentales de este elemento electrónico.

TABLA IX

DATOS GENERALES DE UNA RESISTENCIA DE 220 OHMIOS

| Resistencia | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Resistencia eléctrica (R) | 220 | Ω |
| | Potencia (P) | $\frac{1}{4} = 0{,}25$ | W |

### 3.3.1.6. Diodo 1N4007

El diodo 1N4007 es un diodo rectificador que permite el flujo de corriente eléctrica en una sola dirección. Este elemento presenta una baja resistencia cuando se encuentra polarizado en forma directa, es decir, cuando el cátodo tiene un voltaje mayor que el ánodo. [44].

En este proyecto, el diodo 1N4007 se incorporó después del filtrado del circuito, asegurando que la energía fluya únicamente hacia la carga. Esto evita que la batería se descargue cuando está conectada al circuito. Las especificaciones técnicas de este dispositivo se presentan en la TABLA X.

TABLA X

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DIODO 1N4007

| Diodo 1N4007 | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Voltaje inverso pico máximo | 1000 | V |
| | Voltaje máximo RMS | 700 | V |
| | Voltaje de bloqueo máximo DC | 1000 | V |
| | Corriente máxima | 1 | A |
| | Corriente inversa | 50 | ηA |
| | Temperatura de operación máxima | 175 | °C |
| | Voltaje directo máximo (VF) | 1.1 | V |

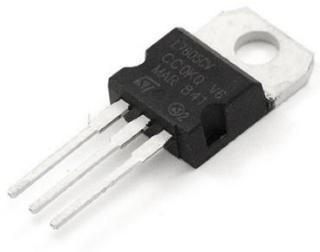
### 3.3.1.7. Regulador de voltaje LM7805

Es un dispositivo diseñado que garantiza un voltaje de salida fijo de 5V, independientemente de las variaciones en el voltaje de entrada, siempre que se mantenga dentro de sus límites operativos. Además, el LM7805 incorpora funciones de protección contra sobrecargas térmicas y limita la corriente interna en caso de cortocircuitos. [45].

En este proyecto, se utilizó el LM7805 para evitar los picos de voltaje en la salida generados por los discos piezoeléctricos, asegurando una señal estable y adecuado para el correcto funcionamiento del sistema. En la TABLA XI se detalla las especificaciones técnicas generales de este dispositivo.

**TABLA XI**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL REGULADOR DE VOLTAJE LM7805**

| LM7805 | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
|  | Voltaje de entrada | 7 - 35 | V |
| | Voltaje de salida | 5 | V |
| | Corriente de salida | 1,5 | A |
| | Número de salidas | 1 | - |
| | Caída de voltaje | 2 | V |
| | Número de pines | 3 | - |
| | Peso | 1 | gr |
| | Temperatura máxima de operación | +125 | °C |
| | Regulación de carga | 100 | mV |
| | Regulación de línea | 100 | mV |

### 3.3.1.8. Circuito amplificador “Buck Boost”

El circuito amplificador Buck Boost es un convertidor de corriente directa (DC) a corriente directa (DC), en el cual la señal de salida es mayor o menor que la señal de entrada. Este dispositivo actúa como una fuente de alimentación conmutada y está conformado por dos interruptores semiconductores, el diodo y transistor, asimismo, cuenta con un elemento de almacenamiento de energía. [38]

La función principal de este circuito dentro del prototipo es aumentar o disminuir el voltaje de entrada para alcanzar un nivel adecuado para la carga de la batería o el funcionamiento de los dispositivos conectados al sistema. A continuación, en la **TABLA XII** se muestran los detalles técnicos del circuito amplificador.

**TABLA XII**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CIRCUITO AMPLIFICADOR**

| Buck-Boost | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Voltaje de entrada | 5 - 12 | V |
| | Voltaje de salida máxima | 24 | V |
| | Corriente de salida máxima | 2 | A |
| | Frecuencia de respuesta | 20 – 20k | Hz |
| | Regulación de carga | ± 1 % | - |
| | Regulación de línea | ± 2 % | - |
| | Distorsión armónica | < 0.5 % | - |
| | Impedancia de entrada | 10 | kΩ |
| | Impedancia de salida | 100 | Ω |

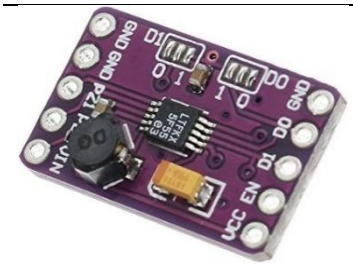
### 3.3.1.9. Módulo LTC 3588-1

El módulo LTC 3588-1, es un circuito integrado para la gestión de energía, es decir, está diseñada principalmente para aplicaciones de generación de energía mediante fuentes de generación piezoeléctrica. Tiene como objetivo principal convertir y regular la energía capturada para generar una salida estable, permitiendo cargar baterías o dispositivos de bajo consumo. Los detalles técnicos se muestran en **TABLA XIII**.

**TABLA XIII**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL LTC 3588-1**

| LCT 3588-1 | Características | Valores | Unidades |
|---|---|---|---|
| | Corriente de reposo de entrada | 950 | ηA (Nano amperios) |
| | Corriente de reposo de entrada en UVLO | 450 | ηA (Nano amperios) |

| | | | |
|---|---|---|---|
|  | Voltaje de entrada | 2.7 a 20 | V (Voltios) |
| | Corriente de salida | 100 | mA (Miliamperios) |
| | Voltajes de salida | 1.8, 2.5, 3.3 y 3,6 | V (Voltios) |

### 3.3.1.10. Plantilla flexible - plantilla semirrígida impresa en 3D

La selección de una plantilla sólida impresa en 3D se justifica por su capacidad de personalización y precisión, permitiendo una distribución uniforme y estable de los dispositivos piezoeléctricos de disco cerámico, lo que optimiza la generación de energía al asegurar que los componentes reciban una presión constante. Esta plantilla sólida ofrece mayor durabilidad y protección a los piezoeléctricos, garantizando la estabilidad de las conexiones. Por otro lado, la plantilla flexible, fabricada con materiales como el polietileno acolchonado, se eligió por su adaptabilidad a la anatomía del pie, lo que permite una deformación mecánica adecuada durante la pisada. Esta flexibilidad facilita la conversión eficiente de energía al permitir que los piezoeléctricos flexibles acoplados se deformen correctamente, generando energía de manera eficaz durante todo el ciclo de pisada, mejorando el rendimiento global del sistema y asegurando una experiencia más natural y cómoda para el usuario.

## 3.3.2. Softwares utilizados

Los programas computaciones desempeñan un objetivo fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que facilitan el análisis de circuitos eléctricos mediante las funciones especializadas que tienen incorporadas, Estos softwares permiten realizar simulaciones detalladas, evaluar el comportamiento de un circuito determinado y modificar sus variables según sea necesario para optimizar el diseño.

A continuación, se presenta la descripción del software utilizado para el diseño y desarrollo del prototipo.

### 3.3.2.1. Proteus 8 Professional

Proteus es un software desarrollador por Labcenter Electronics que permite diseñar y simular circuitos eléctricos, abarcando desde elementos pasivos hasta

microcontroladores. Es ampliamente utilizado en diversas áreas de ingeniería, incluyendo la biomédica y la telemedicina, donde se combinan herramientas de la ingeniería electrónica con la medicina para crear soluciones innovadoras. [46]

Además, ofrece herramientas integradas para la captura de esquemas y el diseño de PCB, proporcionado un flujo de trabajo eficiente y profesional. Este software tiene la posibilidad de realizar simulaciones detalladas de circuitos, lo que permite diseñar, realizar pruebas y depurar sistemas integrados completos dentro de un entorno virtual antes de solicitar un prototipo físico. [47]

En este proyecto, el software fue primordial para realizar el diseño y la construcción del circuito de carga conectada a la salida del prototipo, este ayudó a conocer y medir los valores de voltaje y corrientes que se generan a partir de un modelado eléctrico de los dispositivos piezoeléctricos, Además, permitió analizar las diferentes formas de ondas producidas en cada etapa del circuito regulador de carga, asegurando un diseño eficiente y funcional.

#### 3.3.2.2. Matlab/Simulink

En el presente estudio se utilizó el software de Matlab para complementar y respaldar los datos obtenidos de la investigación. Matlab es una plataforma especializada en programación y cálculos numéricos, que facilita el análisis de datos, el desarrollo de algoritmos y creación modelos. Además, cuenta con una amplia gama de funciones integradas y herramientas de simulación, lo que lo convierte en una herramienta esencial para resolver problemas complejos. [48]

Utilizando Matlab/Simulink, que cuenta con librerías y componentes diseñados para modelar sistemas físicos reales, se llevó a cabo la simulación del sistema piezoeléctrico. A partir de dicha simulación, se determinó la energía generada durante el movimiento continuo, además, se obtuvieron las señales correspondientes de cada etapa del sistema.

Adicionalmente, se desarrollaron códigos específicos en Matlab para realizar los cálculos pertinentes, permitiendo determinar los parámetros como el voltaje, la corriente, cantidad de pasos y puntos de mayor presión en el pie. Los resultados obtenidos fueron consistentes y proporcionaron una perspectiva realista a la generación con un modelo real.

#### 3.3.2.3. Fusión 360

Autodesk Fusión es una plataforma de software que incorpora funciones de CAD, CAM, CAE y diseños de circuitos impresos de modelado 3D basada en la nube. Esta herramienta está diseñada para facilitar el proceso de diseño y manufactura de productos, es muy utilizado debido a su amplia gama de componentes electrónicos, así como sus herramientas de diseño industrial y circuitos impresos. [49]

Autodesk Fusión permitió la creación de un diseño 3D de una plantilla de calzado común, incorporando bases para el acoplamiento de los dispositivos piezoeléctricos. Con este diseño, se realizó la impresión 3D utilizando un material flexible, lo que permitió obtener una base adaptable para la integración de los dispositivos piezoeléctricos.

#### 3.3.2.4. Arduino IDE

El entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino es una plataforma de código abierto que facilita la escritura de líneas de códigos y cargar programas en las placas Arduino. El código desarrollado por el usuario generalmente requiere solo dos funciones principales: la configuración inicial, permite la formación de periféricos, interrupciones y otros aspectos, y el programa de ejecución de bucle que se repite continuamente. Este software libre es ideal para escribir, depurar, editar y documentar cualquier programa de una manera sencilla. [50]

El Arduino IDE se utilizó en este trabajo para registrar los datos de generación de energía del sistema piezoeléctrico. Para ellos, se escribieron líneas de códigos específicas para permitir la comunicación entre la placa Arduino y la computadora. Además, se programó un código para el sensor de voltaje, lo que permitió obtener y enviar los datos a la computadora durante las pruebas de funcionamiento del sistema.

### 3.4. Ecuaciones

A continuación, se detalla las ecuaciones matemáticas que influyen para la generación de energía, almacenamiento y carga a partir de los materiales piezoeléctricos, es necesario tener en cuenta los parámetros de la piezoelectricidad. El comportamiento de un material piezoeléctrico depende de tres constantes: constantes elásticas, constantes piezoeléctricas y constantes dieléctricas. [51]

### 3.4.1. Generación de energía mediante los pasos humanos

La idea de generar energía mediante los pasos humanos esta relaciona con el estudio de la cantidad de energía mecánica que se puede obtener cuando una persona está en movimiento.

Para el cálculo de la potencia resultante en base al número de pasos dados, se obtiene mediante la ecuación 1.

$$(p)(g)(h_{pt})(F_P) = p(W) \quad (1)$$

Donde:

p: Es el peso de la persona en Kg.

g: Es la aceleración de la gravedad (9,81 m/$s^2$).

$h_{pt}$: Es la altura del tobillo con relación al piso en m.

$F_P$ : Frecuencia de pasos por segundo (Hz).

P: Es la potencia medida en W.

## 3.5. Parámetros eléctricos y mecánicos aplicables al sistema piezoeléctrico.

Para la realización de un análisis completo del generador piezoeléctrico (plantilla piezoeléctrica) basado en sensores PZT, se requiere tener en cuenta los parámetros de dicho material, las cuales se detallan a continuación.

- Tipo de material PZT
- Constantes piezoeléctricas
- La resistividad de los transductores PZT
- Fuerza que actúa sobre el material
- El nivel de deformación
- La dimensión del material PZT
- Perdidas de carga
- Capacitancia estática del material PZT

## 3.6. Constantes piezoeléctricas

Los parámetros y características que tienen los materiales piezoeléctricos dieron a conocer la relación que existe ante una acción mecánica y en consecuencia obtener una respuesta eléctrica. En otras palabras, detallan la capacidad que tiene el material para

transformar la energía mecánica a energía eléctrica y viceversa, las cuales se dividen como efecto piezoeléctrico directo e inverso. [51]

### 3.6.1. Efecto piezoeléctrico directo

El efecto piezoeléctrico directo es una de las constantes piezoeléctricas que describen la relación entre la energía piezoeléctrica generada en respuesta a una fuerza mecánica que interactúa sobre el material, es expresada en Coulomb por Newton (C/N). A partir de la ecuación 2 se puede determinar el efecto piezoeléctrico directo. [10]

$$P = dT \tag{2}$$

Donde:

P: Es la densidad de carga generada en la superficie del material. $(\frac{C}{m^2})$

d: Coeficiente de deformación del material. $(\frac{C}{N}$ ó $\frac{m}{V})$

T: Presión mecánica sometida al material. $(\frac{N}{m^2}$ ó $Pa)$

### 3.6.2. Constante de carga (d)

También conocido como la constante de deformación (d), es la polarización que se genera en cortocircuito por unidad de tensión o fuerza mecánica que se aplica. A partir de la ecuación 3 se puede determinar la constante de carga.

$$d = \frac{P}{T} \tag{3}$$

Donde:

P: Carga eléctrica generada en Culombios (C)

T: Presión mecánica aplicada. $(\frac{N}{m^2}$ ó $Pa)$

### 3.6.3. Efecto piezoeléctrico inverso

El efecto piezoeléctrico inverso es una deformación mecánica que se genera al momento que se aplica un campo eléctrico, la cual viene dada en términos de metro por voltio (m / V). [51]

## 3.7. Modelos matemáticos de los parámetros eléctricos

El presente trabajo de integración curricular expone la base matemática correspondiente para determinar el comportamiento de las constantes eléctricas del material piezoeléctrico, los valores de tensión generados y los valores teóricos de la

corriente que son expresados por cada grupo de los materiales piezoeléctrico y la potencia que esta pueda generar.

### 3.7.1. Tensión eléctrica por deformación del material piezoeléctrico PZT

Para el cálculo de la tensión eléctrica por deformación de los sensores piezoeléctricos, es necesario conocer la constante piezoeléctrica correspondiente al material. Dicha constante determina la relación que existe entre el cambio de tamaño del material piezoeléctrico en metros y la diferencia de potencial medida en voltios. [52]

Con la ecuación 4 se puede determinar la tensión que genera el material piezoeléctrico debido a una carga mecánica que actúa sobre un área determinada.

$$V = \left(g33 * h * \frac{f}{A}\right) = \left( g33 * h * \left(\frac{f}{d^2 * \frac{\pi}{4}}\right)\right) \quad (4)$$

Donde:

V: Es la tensión pico esperada por la deformación del material piezoeléctrico

g33: Constante piezoeléctrica. (Vm/N)

h: longitud o grosor del material piezoeléctrico. (m)

d: Diámetro efectivo del material piezoeléctrico.

A: Área del piezoeléctrico ($m^2$). La fuerza aplicada sobre el área se denomina nivel de estrés del material piezoeléctrico.

f: Es la fuerza aplicada al material piezoeléctrico (N)

Para el sensor piezoeléctrico de 27 mm de diámetro en su diafragma y 20 mm de diámetro en el cerámico, la constante piezoeléctrica es: $2 * 10^{-3}\ Vm\ /\ N$

### 3.7.2. Intensidad de corriente del material PZT

Los materiales piezoeléctricos que están conectados en paralelo mantienen el mismo voltaje independientemente de la cantidad dispositivos conectados. Por otro lado, la corriente varía dependiendo de la cantidad de dispositivos conectados, de igual forma su impedancia. La corriente eléctrica se puede calcular a partir de la ecuación 5 que se detalla a continuación. [53]

$$I = \frac{V}{R} \quad (5)$$

Donde:

I: Intensidad de corriente en amperios (A)

V: Es la tensión aplicada al material piezoeléctrico medido en voltios (V)

R: Es la resistencia del circuito eléctrico medido en ohmios (Ω)

$$I = \frac{V}{Z} \tag{6}$$

Z: Impedancia del circuito eléctrico medido en ohmios (Capacitancia e inductancia).

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \tag{7}$$

Donde:

Z: Impedancia total (Ω)

R: Resistencia interna del material. (Ω)

$X_C$: Reactancia capacitiva. (Ω)

$X_L$: Reactancia inductiva. (Ω)

L: Inductancia. (H)

f: Frecuencia de operación. (Hz)

C: Capacitancia del material. (F)

### 3.7.3. Potencia generada por el material PZT

La potencia que puede generar mediante el accionamiento del generador piezoeléctrico viene dada como el producto de la tensión de salida por la intensidad de corriente. Es decir, se obtiene al multiplicar la tensión por la intensidad. Dicha potencia se puede calcular a partir de la ecuación 8 que se muestra a continuación. [54]

$$P = (V) * (I) \tag{8}$$

Donde:

P: Potencia generada en vatios (W)

V: Voltaje que circula por el circuito medido en voltios (V)

I: Intensidad de corriente medida en amperios (A)

### 3.7.4. Tiempo de carga de la batería

En este apartado el objetivo principal es almacenar la energía que se genera por cada pisada realizada en la batería de litio recargable, mediante la ecuación 9 se puede determinar el tiempo requerido para cargar la batería.

$$Tiempo\ de\ carga\ 1V: \frac{s * 1V}{Voltaje\ transferido\ (V)} \tag{9}$$

Donde:

s: Es el tiempo en segundo del voltaje cargado en la batería.

### 3.7.5. Tiempo de descarga del sistema

Para determinar el tiempo de descarga de la batería que almacena la energía generada por los sensores piezoeléctricos hacia la carga conectada se emplea la ecuación 10 que se detalla a continuación.

$$Tiempo\ de\ descarga: \frac{Capacidad\ de\ la\ batería\ (Ah)}{Carga\ conectada\ (A)} \tag{10}$$

### 3.7.6. Área de acción del sensor piezoeléctrico

El área de acción es donde va a estar actuando el piezoeléctrico al momento que interactúa con una fuerza mecánica aplicada. El área efectiva del material se puede calcular con la ecuación 11 a partir del diámetro del sensor piezoeléctrico.

$$A = (d^2)(\frac{\pi}{4}) \tag{11}$$

Donde:

A: Es el área de acción del disco ($m^2$).

$\pi$ : 3.1416, es una constante.

d: Es el diámetro del material piezoeléctrico (m).

## 3.8. Modelo matemático de los parámetros mecánicos

La relación de las matemáticas con los patrones eléctricos, se basan en la funcionalidad de los generadores a base de materiales piezoeléctricos, que se llevan a cabo en los sistemas eléctricos que operen sobre ellos.

### 3.8.1. Fuerza aplicada a los materiales piezoeléctricos

Para calcular la fuerza que se ejerce sobre el disco cerámico piezoeléctrico o el peso que se le aplique a la misma, se hará uso de la ecuación 12 que se muestra a continuación.

$$F = m * g \tag{12}$$

Donde:

F: Fuerza (N)

m: Es la masa del objeto que actúa sobre el material piezoeléctrico. (Kg)

g: Es la constante de gravedad. (9,8 $m/s^2$ )

### 3.8.2. Energía mecánica (Em)

La energía mecánica que ejerce un cuerpo es el resultado de la suma entre la energía cinética y la energía potencial, donde la energía potencial involucrada es la energía potencial gravitatoria y elástica. La energía mecánica se puede determinar a partir de la ecuación 13.

$$EM = Ec + Epg + Epe \tag{13}$$

Donde:

Ec: Es la energía cinética

Epg: Es la energía potencial gravitatoria

Epe: Energía potencial elástica

Como anteriormente ya se mencionó, la energía mecánica aplicada es la energía potencial gravitatoria y cinética. Para determinar la energía potencial gravitatoria se utiliza la ecuación 14.

$$Epg = m * g * h \tag{14}$$

Donde:

m: Es la masa del objeto

g: Es la constante de gravedad (9,81 $m/s^2$)

h: Altura que se encuentra un objeto en relación con un punto de referencia.

$$Epe = \left(\frac{1}{2}\right) * k * x^2 \tag{15}$$

Donde:

k: Es la constante elástica del resorte.

x; La deformación del resorte desde el punto de equilibrio.

Para determinar la energía cinética se utiliza la ecuación 16, debido a que es la energía que se asocia al movimiento de un objeto.

$$Ec = \frac{1}{2} * (m) * (v^2) \quad (16)$$

Donde:

m: Es la masa del objeto

v: Velocidad del objeto

### 3.8.3. Distancia recorrida en pasos

Para determinar la distancia recorrida a partir del número de pasos, es necesario conocer previamente la longitud de zancada correspondiente a un paso completo. Esta relación permite calcular de forma aproximada el desplazamiento total durante una prueba de caminata, trote o carrera y se expresar mediante la ecuación 17. [51]

$$D_T\ (m)\ = L_z * N_p \quad (17)$$

Donde:

$D_T$: Es la distancia recorrida (m)

$L_z$: Es la longitud de zancada (m/paso)

$N_p$: Es el número de pasos

Para calcular la longitud de un paso (expresada en metros), se puede utilizar la ecuación 18, la cual se basa en la estatura del sujeto y ha sido determinada a partir de estudios biomecánicos que analizan el movimiento humano durante la marcha, el trote y la carrera.

$$L_Z = Estatura * k \quad (18)$$

Donde:

k : Es el tipo de desplazamiento (k = 0.41 - caminata; k = 0.65 - trote y k = 0.78 – carrera)

### 3.8.4. Frecuencia de pasos por minutos (PPM)

La cadencia de los pasos por minuto (ppm), tanto en caminata como en trote o carrera, se determina contando el número total de pasos realizados durante un intervalo de tiempo específico. Esta medida de obtiene aplicando la ecuación 19.

$$Frecuancia\ de\ pasos\ (Fp) = \frac{N_p}{t} * 60_s \quad (19)$$

Donde:

$N_p$: Número de pasos.

t: Tiempo en segundos (s)

### 3.8.5. Frecuencia de pasos en Hertz (Hz)

Para determinar la frecuencia de los pasos, expresada en Hertz (Hz), es indispensable conocer el tiempo que una persona tarda en dar un paso. Este valor puede calcularse mediante la aplicación de la ecuación 20.

$$F = \frac{\#\ total\ de\ pasos}{t} \quad (20)$$

Donde:

$F$: Es la Frecuencia. (Hz)

t: Es el tiempo en segundos (s).

### 3.8.6. Velocidad de pasos (m/s)

Para determinar la velocidad de los pasos en m/s. es necesario medir la distancia de un paso en metros (m) y el tiempo que se tarda en dar ese paso en segundos, se puede obtener el valor de la velocidad aplicando la ecuación 20.

$$v = \frac{L_p}{t} \quad (21)$$

Donde:

$L_p$: Longitud de un paso en metros (m)

t: Es el tiempo en segundos (s)

### 3.8.7. Energía generada por pasos (J)

A partir de la ecuación 22 se puede calcular la energía generada en función de la potencia desarrollada y el intervalo de tiempo, comprendiendo la relación directa entre la potencia (W) y la energía acumulada (J).

$$E = P * t \quad (22)$$

Donde:

P: Potencia generada mediante pasos en Watts (W)

t: Tiempo en segundos de las pisadas efectuadas (s)

El tiempo en segundos, es el tiempo de los 30 segundos que se realizaron las pruebas experimentales.

### 3.8.8. Presión ejercida por una persona

A partir de la ecuación 22 se puede determinar la presión total que una persona puede ejercer con el pie sobre el material piezoeléctrico.

$$P = \frac{F}{A} \tag{23}$$

Donde:

P: Es la presión total que ejerce el humano con el pie (Pa o $\frac{N}{m^2}$)

F = Fuerza ejercida (N)

A = Es el área total del piezoeléctrico ($m^2$)

# CAPÍTULO IV

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo se centra en la construcción, implementación y prueba del prototipo de plantillas piezoeléctricas y su circuito de control de carga, incluyendo las simulaciones correspondientes, así como los cálculos eléctricos y matemáticos aplicados al modelo del sistema. Para la adquisición de datos del funcionamiento del prototipo se utilizó el entorno de desarrollo Arduino IDE. Asimismo, se presentan las pruebas experimentales realizadas, así como los ajustes implementados para evaluar el desempeño de los piezoeléctricos cerámicos rígidos y flexibles.

## 4.1. Pruebas de generación en los dispositivos piezoeléctricos

Se llevaron a cabo dos ensayos eléctricos fundamentales de manera individual en los dispositivos piezoeléctricos, con el propósito de identificar y confirmar las propiedades eléctricas que teóricamente deberían presentar.

A continuación, se detallan las pruebas realizadas de forma independiente en cada uno de los dispositivos: medición de la tensión generada a partir de un impulso mecánico directo y medición de la corriente eléctrica inducida bajo la misma condición de estimulación mecánica.

### 4.1.1. Tensión generada por impulso directo

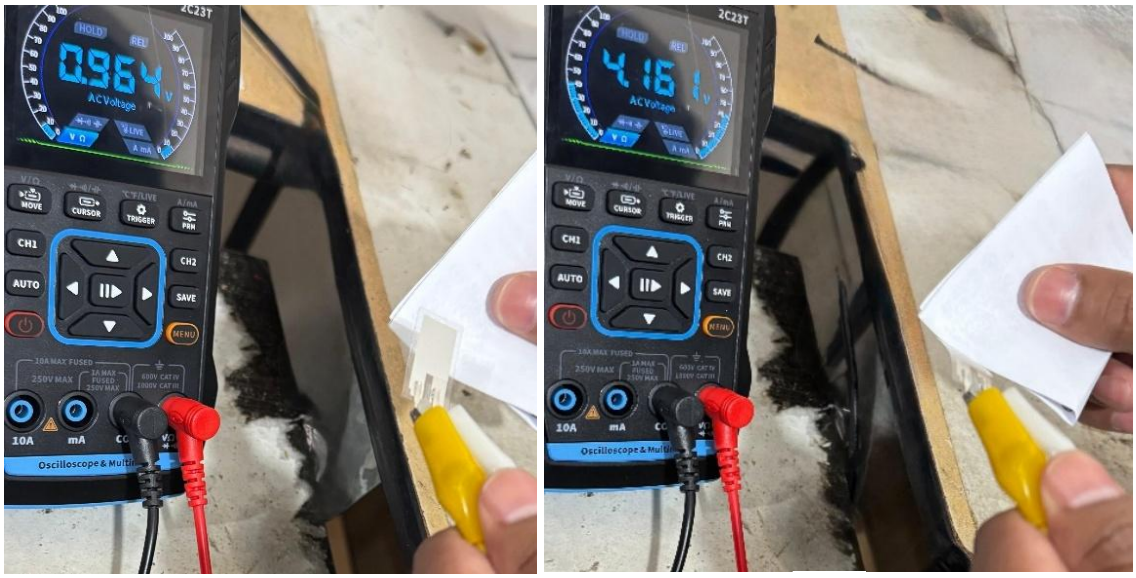
La medición de la tensión real de los dispositivos piezoeléctricos se efectuó de manera individual, mediante la conexión de un multímetro digital a sus respectivos polos. Posteriormente, se aplicó una fuerza mecánica con el objetivo de generar la deformación estructural del material piezoeléctrico y registrar el voltaje generado como respuesta a dicho estímulo.

La razón por la cual en esta sección se realizaron pruebas ejerciendo presión manualmente con los dedos, es que al pisar directamente los piezoeléctricos sin la estructura adecuada, se comprometerían las soldaduras de los componentes, lo que afectaría la precisión de las mediciones y podría dañar el sistema. Por esta razón, para las medidas iniciales de voltaje y corriente, además de para obtener el tipo de gráfica representativa de la respuesta dinámica de los piezoeléctricos, se optó por aplicar una presión controlada con los dedos. Esto permitió registrar las características de la señal

generada de manera segura y estable, sin el riesgo de dañar el prototipo durante las fases iniciales de prueba.

#### 4.1.1.1. Prueba de voltaje generado en corriente alterna (AC) en piezoeléctrico flexible

En las fig. 11, se ilustra los valores de voltaje generados en corriente alterna (AC) al aplicar directamente una fuerza o presión mecánica que induce la deformación del material.




**A)** **B)**

**Fig. 11. A) Prueba 1 de voltaje generado. B) Prueba 2 de voltaje generado**

Según lo presentado en la Fig. 11 A) y B), se efectuaron ensayos de deformación manual sobre el dispositivo piezoeléctrico flexible, registrando tensiones generadas en un rango aproximado de 0.964 voltios (V) a 4,16 voltios (V). La variabilidad de los valores de voltaje depende tanto de la magnitud de fuerza ejercida como de la duración de la presión aplicada.

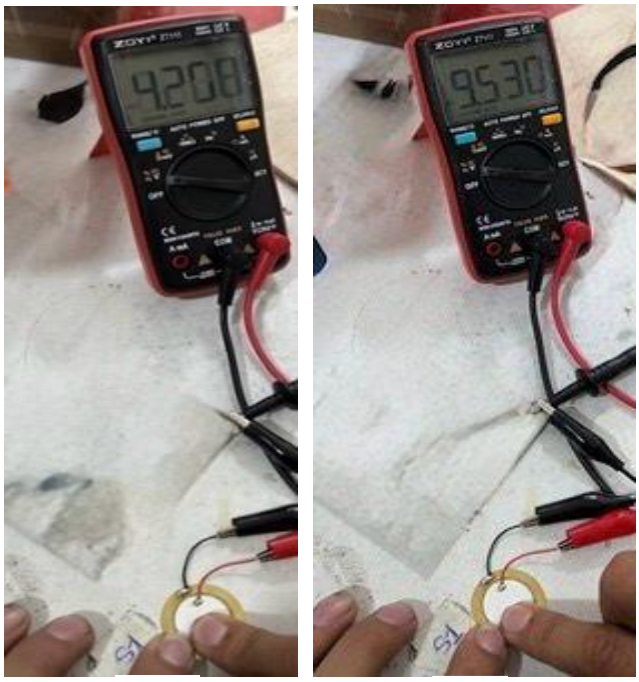
#### 4.1.1.2. Prueba de señal AC generado con piezoeléctrico flexible

Para registrar la respuesta del dispositivo, se conectó un osciloscopio a sus terminales y, al aplicar manualmente una fuerza mecánica, se obtuvo la forma de onda que se muestra en la Fig. 12.

**Fig. 12. Señal de voltaje generado en el piezoeléctrico flexible.**

### 4.1.1.3. Prueba de voltaje generado en AC con cerámico piezoeléctrico rígido

En la Fig. 13 se puede observar la tensión generada registrada con un multímetro digital. Las mediciones se llevaron a cabo de forma individual, conectando el instrumento al electrodo cerámico (terminal positivo) y al electrodo metálico (terminal negativo) del disco piezoeléctrico. La deformación del material se indujo mediante la aplicación manual de una fuerza mecánica sobre la superficie del dispositivo.



**A)** **B)**

**Fig. 13. A) Prueba 1 de tensión generada. B) Prueba 2 de tensión generada.**

En las figuras 13 A) y B) se observa que el rango de tensión obtenido es más elevado, oscilando entre los 4.2 voltios (V) y 9.5 voltios (V). El valor resultante de voltaje es variable, dependiendo de la fuerza y el tiempo que se aplica sobre el piezoeléctrico.

#### 4.1.1.4. Señal AC generada por disco piezoeléctrico

En la Fig. 14, se presenta la señal eléctrica generada durante las pruebas individuales de los materiales piezoeléctrico. Esta señal fue registrada mediante un osciloscopio, como respuesta a la aplicación directa de la fuerza mecánica sobre el dispositivo.

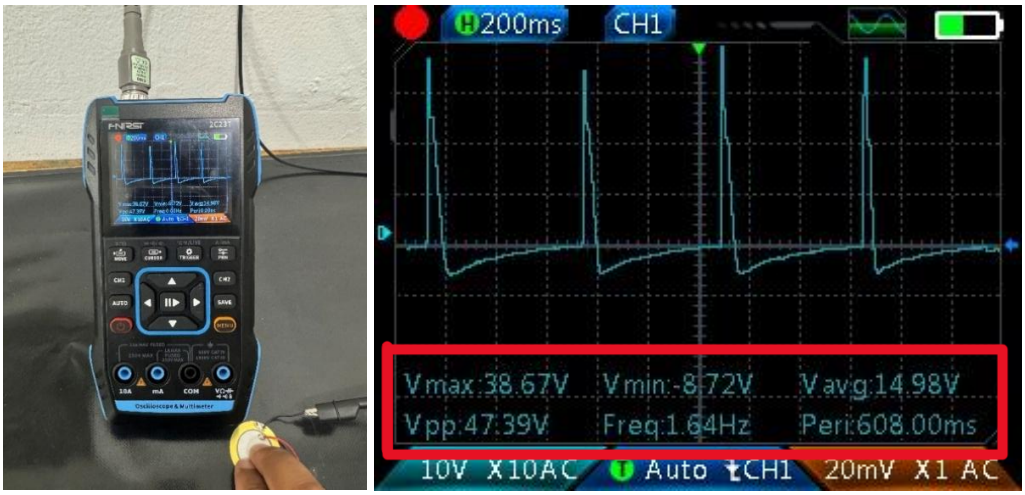



**Fig. 14. Señal generada por la fuerza aplicada directamente a un disco piezoeléctrico.**

En la Fig. 14 se aprecia que la señal eléctrica obtenida presenta un comportamiento periódico con picos pronunciados, lo cual evidencia la repuesta dinámica del material piezoeléctrico al ser sometido a una fuerza mecánica constante. En el recuadro rojo resaltado sobre la imagen se indican los valores obtenidos durante las pruebas realizadas.

Como se puede observar en las figuras 11 y 13, el valor del voltaje obtenido es variable, ya que estos dispositivos piezoeléctricos están relacionados con la fuerza mecánica que actúa sobre ellos. Es decir, a mayor presión aplicada sobre los dispositivos piezoeléctricos, mayor será el voltaje generado. Por otro lado, debido a la naturaleza flexible del material piezoeléctrico de PVDF, el voltaje generado es menor. Esto se debe a que la deformación de los materiales flexibles se distribuye de manera más uniforme, reduciendo el impacto al momento se aplicarse una fuerza mecánica.

### 4.1.2. Corriente generada por impulso directo

Al igual que en la medición del voltaje, la corriente varía dependiendo de la fuerza que se ejerce sobre los dispositivos piezoeléctricos.

#### 4.1.2.1. Corriente generada por el piezoeléctrico flexible

Para medir la corriente eléctrica generada por un dispositivo piezoeléctrico flexible se conectó el multímetro digital en cortocircuito con el dispositivo piezoeléctrico, es decir, conectando directamente el multímetro al terminal positivo y negativo del material, obteniendo como resultado corriente eléctrica en corriente alterna (AC).

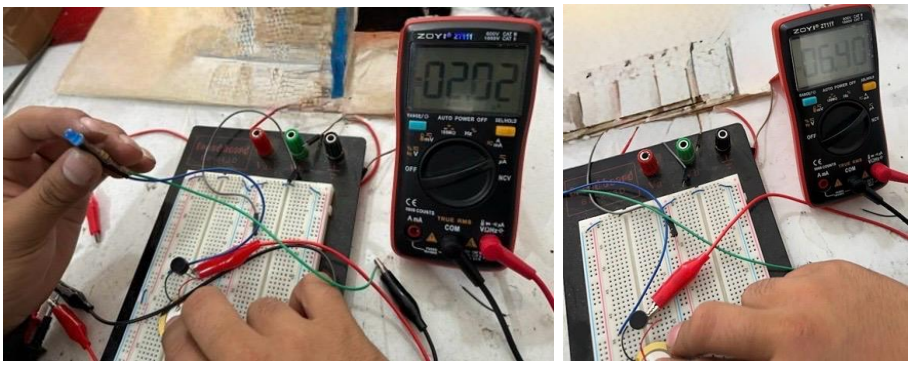
**A)** **B)**

**Fig. 15. A) Prueba 1 de la medición de corriente eléctrica. B) Prueba 2 de la medición de corriente eléctrica.**

En la Fig. 15 A) y B), respectivamente, se pueden observar los valores de corriente máxima instantánea disponible obtenidos cuando los dispositivos fueron sometidos a una fuerza mecánica directa, deformando el piezoeléctrico directamente con la mano, donde el valor obtenido oscila aproximadamente entre 6 µA (microamperios) y 8 µA (microamperios).

#### 4.1.2.2. Corriente generada por el disco piezoeléctrico

En la Fig. 16 se puede observar la corriente generada por los discos piezoeléctricos de forma individual, la cual oscila aproximadamente entre 2 µA (microamperios) y 6 µA (microamperios). La corriente generada por el disco piezoeléctrico se midió en corriente directa (DC), conectando el multímetro en serie con el circuito.



**A)** **B)**

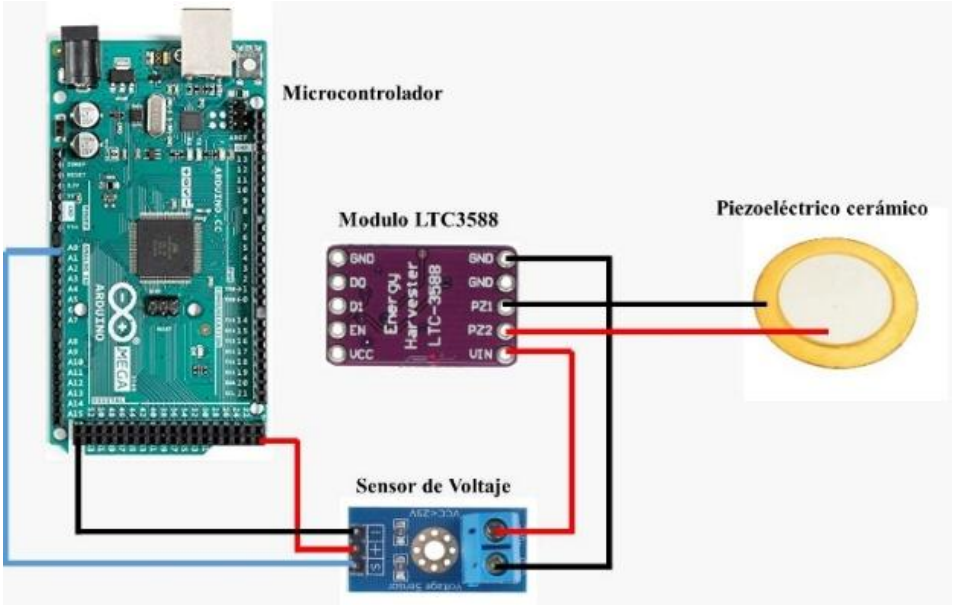
**Fig. 16. A) Prueba 1 de la medición de corriente DC. B) Prueba 2 de la medición de corriente DC**

En la Fig. 16 A) y B), se puede apreciar que al igual que en los ensayos de medición de voltaje, la corriente generada presenta un comportamiento variable, dado que depende directamente de la fuerza aplicada y del tiempo de contacto sobre el material piezoeléctrico.

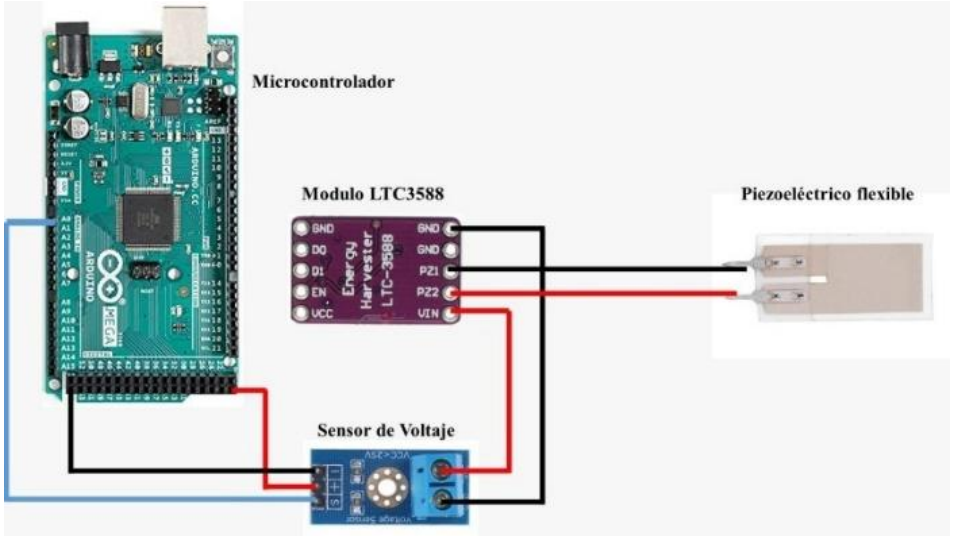
Para llevar a cabo la medición de corriente continua (DC), se incorporó un puente rectificador de onda completa 2W10, el cual permitió la conversión de la señal de corriente alterna (AC) generada por el material piezoeléctrico a corriente directa (DC). Adicionalmente, se incluyó un diodo LED como carga indicadora, y el circuito se cerró conectando un multímetro en serie para registrar los valores de corriente obtenidos, los cuales se muestran en las imágenes correspondientes a la Fig. 16.

### 4.2. Voltaje DC generado con módulo LTC-3588

La Fig. 17 ilustra de forma representativa la interconexión entre un microcontrolador Arduino, un módulo LTC 3588, un sensor de voltaje y los dispositivos piezoeléctricos. Como se puede apreciar en la Fig. 17 A) se utilizó el módulo LTC 3588 con el disco piezoeléctrico cerámico y en la Fig. 17 B) se puede observar con el dispositivo piezoeléctrico flexible, en ambos casos, se midió la generación de voltaje utilizando el software de Matlab.




**A)**



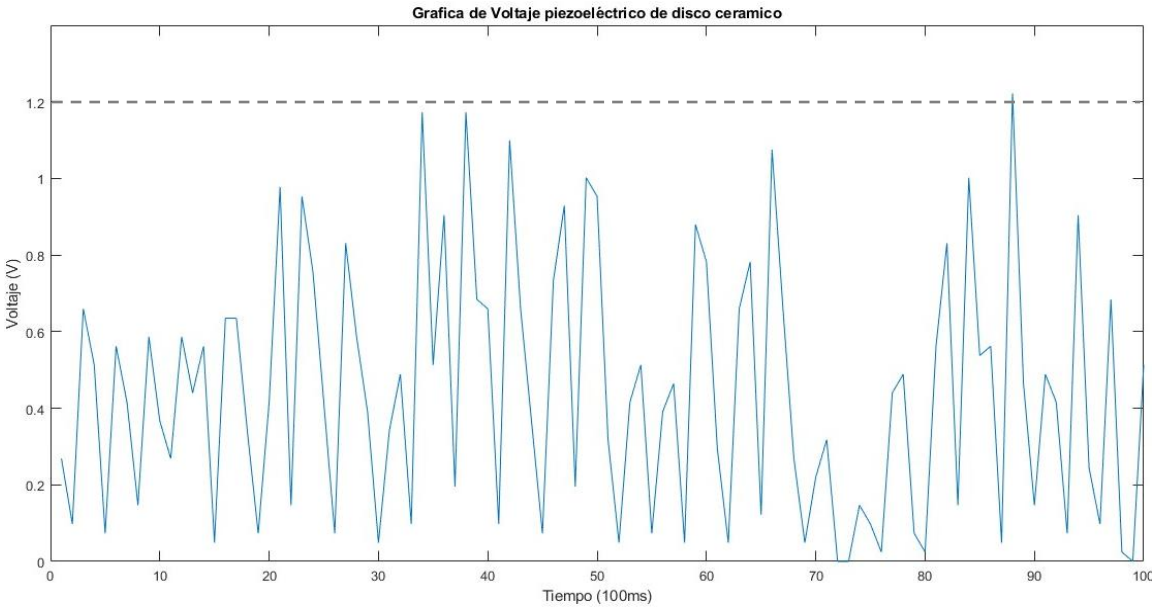

**B)**

**Fig. 17. A) Conexión del LTC 3588 con disco piezoeléctrico. B) Conexión del LTC 3588 con piezoeléctrico flexible**

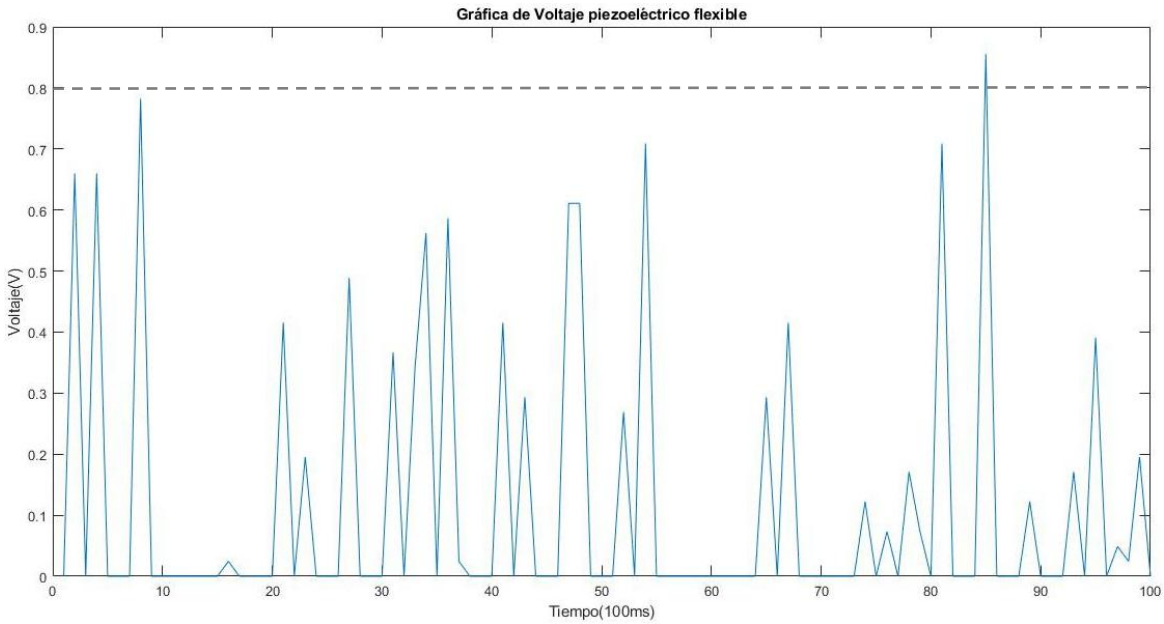
En el prototipo final cuenta con la incorporación del piezoeléctrico cerámico rígido, así como del piezoeléctrico flexible. La energía generada por estos elementos es conducida hacia el circuito integrado LTC 3588, el cual cumple la función de rectificar, regular y almacenar dicha energía en un capacitor interno, permitiendo así la alimentación de cargas de baja potencia. Para la obtención de los datos de funcionamiento del sistema, se utilizó la placa Arduino Mega 2560. Esta placa tiene la función de captar las señales

provenientes del sensor de voltaje y, en función del programa desarrollado, registra y envía los datos obtenidos a la computadora para su análisis.

### 4.2.1. Gráfica de voltaje de los elementos piezoeléctricos




**A)**




**B)**

**Fig. 18. A) Gráfica de voltaje con disco piezoeléctrico. B) Gráfica de voltaje con piezoeléctrico flexible**

En la Fig. 18 A) se puede observar el voltaje generado a partir del disco piezoeléctrico, utilizando el módulo LTC-3588 de Energy Harvesting, el cual resulta fundamental para recolectar la energía piezoeléctrica de forma más eficiente y obtener una señal más estable. En la gráfica se evidencia picos de voltajes significativos que llegan a 1,2 V, medidos en intervalos de 100 milisegundos (ms). Este análisis permite concluir que la generación no es constante, debido a que depende directamente de la intensidad y la frecuencia de pasos ejercidos sobre el material piezoeléctrico.

Por otro lado, en la Fig. 18 B) con la misma configuración experimental el voltaje generado es menor en comparación con el disco piezoeléctrico. Debido a la naturaleza flexible del material, la cual genera picos de voltajes de menor magnitud, llegando a generar 0,85 V. Esto se debe a que la deformación de los materiales se distribuye de forma más homogénea, reduciendo el impacto al momento de caminar.

### 4.3. Desarrollo del prototipo de la plantilla para los dispositivos piezoeléctricos

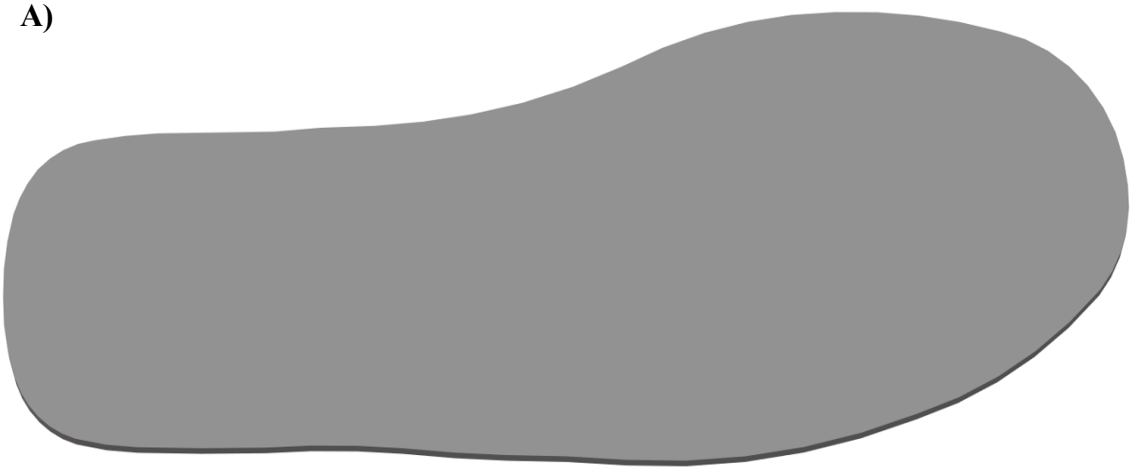
En esta sección se describe la estructura física del prototipo desarrollado, así como la ubicación estratégica de los elementos piezoeléctricos y su integración con los componentes electrónicos del sistema. El diseño se orientó a lograr un equilibrio entre eficiencia energética y viabilidad de uso en condiciones reales.

Se optó por una plantilla piezoeléctrica personalizada, en la cual se distribuyeron dispositivos piezoeléctricos cerámicos rígidos a lo largo de toda la superficie. La selección de una cobertura completa responde a criterios técnicos y funcionales: al extender los elementos de conversión energética por toda la plantilla, se maximiza el área de captación de energía mecánica generada durante la marcha, aprovechando tanto el impacto en el talón como las presiones que se ejercen durante el apoyo medio y antepié.

En la Fig. 19 A) y B) se presenta el diseño de la plantilla piezoeléctrica elaborado mediante el software Fusión 360 de Autodesk, el cual permitió modelar con precisión cada uno de los componentes estructurales del prototipo. Este software proporciona herramientas avanzadas de modelado paramétrico y análisis, lo que facilitó la obtención de un diseño detallado y optimizado para su posterior fabricación mediante tecnología de impresión 3D. A partir de criterios definidos para la funcionalidad, ergonomía y resistencia mecánica, se obtuvo como resultado una plantilla flexible de 27 cm de largo,

adecuada para adaptarse al tamaño promedio del pie humano. El diseño incorpora 10 bases circulares distribuidas en la zona posterior, específicamente destinadas a alojar los dispositivos piezoeléctricos cerámicos rígidos. Estas bases cumplen la función de proteger los elementos activos frente a las presiones repetitivas durante el ciclo de marcha, evitando daños por esfuerzos concentrados. Además, el diseño considera un espesor y curvatura adecuados para mantener el confort del usuario, permitiendo una integración armónica entre funcionalidad eléctrica y desempeño biomecánico del calzado.

**A)**



**B)**

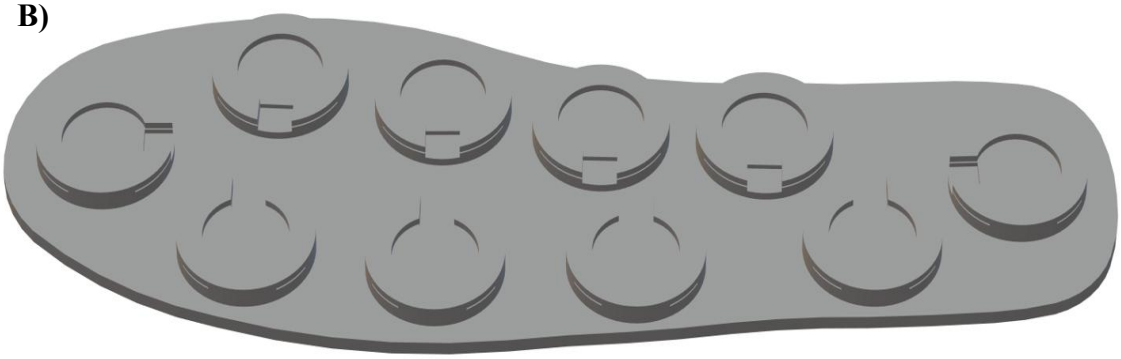


**Fig. 19. A) Vista frontal de la plantilla piezoeléctrica 3D. B) Vista posterior con bases para la ubicación de los piezoeléctricos en la plantilla 3D.**

Como se puede observar en la Fig. 19 B) se consideró ubicar los piezoeléctricos a lo largo de toda la plantilla. Esta configuración fue seleccionada para maximizar la captación de energía en cada fase del ciclo de pisada y mejorar el rendimiento global del sistema.

Si bien diversas investigaciones se enfocan en la recolección de energía únicamente en área del talón, debido a que se concentra la mayor carga inicial en el ciclo de la pisada, en este estudio se decidió abarcar toda la planta del pie con el fin de incrementar el rendimiento energético global del sistema, considerando que el desplazamiento humano implica múltiples fases de contacto con distintas zonas del pie. Además, esta configuración permite distribuir las fuerzas sobre una mayor cantidad de dispositivos.

A pesar de que la zona media del pie (arco del pie) no genera tanto contacto directo con el suelo como el talón o la parte delantera, se optó por poner la plantilla 3D entre la base del zapato y una plantilla ergonómica deportiva con arco, la cual permitió tener contacto con toda la superficie de la plantilla piezoeléctrica, de modo que las propiedades piezoeléctricas permitieron que estas áreas también contribuyan de manera efectiva a la generación de energía, aunque con menor intensidad.

La ubicación de los dispositivos piezoeléctricos dentro de la plantilla responde a la necesidad de maximizar la conversión de energía mecánica en energía eléctrica. Durante el ciclo de la pisada, se identifican tres zonas principales de contacto del pie con el suelo: el retropié (talón), el mediopié y antepié (parte delantera). De estas, el talón es la zona que recibe la mayor carga inicial en cada pisada, debido al impacto vertical del cuerpo al contacto con el suelo. Sin embargo, para aumentar la eficiencia del sistema, se optó por extender la distribución de dispositivos piezoeléctricos a lo largo de toda la plantilla, incluyendo zonas como el mediopié y antepié. Por esta razón, se colocaron 10 dispositivos piezoeléctricos cerámicos rígidos en la parte posterior de la plantilla, donde la presión ejercida durante la fase de apoyo inicial es mayor y más consistente. Esta configuración permite obtener una mayor deformación mecánica en los dispositivos piezoeléctricos, lo que incrementa su capacidad de generar tensión eléctrica según el efecto piezoeléctrico directo.

Como se puede observar en la Fig. 20, los dispositivos piezoeléctricos flexibles se optaron por usar en una plantilla ergonómica acolchonado con arco (la cual se ubica sobre la plantilla 3D de los piezoeléctricos rígidos), debido a sus propiedades de flexibilidad y adaptabilidad a la anatomía del pie humano. Este tipo de plantilla permite una adecuada

deformación mecánica de los dispositivos durante la pisada, lo que favorece la generación de pulsos eléctricos bajo el principio del efecto piezoeléctrico.

**Fig. 20. Plantilla ergonómica con arco.**

De igual forma, en esta plantilla se consideró ubicar 16 elementos piezoeléctricos flexibles distribuidos a lo largo de toda la plantilla, cubriendo todas las zonas de contacto del pie. La plantilla cuenta con un arco interno que permite el contacto completo con la planta del pie, como se muestra en la Fig. 20, donde dicho arco se encuentra remarcado dentro del círculo rojo. Asimismo, la distribución integral de los elementos piezoeléctricos permite aprovechar todas las fases del ciclo de la marcha, generando pulsos eléctricos en múltiples momentos del contacto pie-planta, y no solo al inicio del paso. Esta estrategia mejora el rendimiento energético del sistema, reduce la carga individual sobre cada dispositivo y mantiene una respuesta más uniforme.

En ambos casos, tanto en la distribución de dispositivos piezoeléctricos cerámicos rígidos como flexibles, la selección de su ubicación responde a una justificación técnica basada en la secuencia dinámica del paso humano. Durante el ciclo de pisada, las regiones del retropié, mediopié y antepié experimentan cargas mecánicas significativas durante las fases de contacto inicial y despegue del pie. Aprovechar estas zonas permite maximizar la deformación de los elementos piezoeléctricos y, por tanto, incrementar la eficiencia de la conversión de energía mecánica en eléctrica, optimizando el desempeño del sistema bajo condiciones reales de uso.

## 4.4. Circuito de carga

El circuito de carga es crucial en el sistema piezoeléctrico para llevar a cabo el almacenamiento y posteriormente utilizar la energía para la carga de una batería.

### 4.4.1. Controlador de carga

Respecto al circuito de carga se optó por el módulo LTC3588 de Linear Technology debido a su capacidad para manejar la recolección de energía de fuentes de bajo consumo, como vibraciones y transductores piezoeléctricos. Este módulo cuenta con entradas rectificadas específicamente diseñadas para dispositivos piezoeléctricos, lo que facilita la conversión de la energía mecánica generada por los movimientos del pie en energía eléctrica útil, ideal para alimentar o cargar pequeños dispositivos como baterías. Según las especificaciones del fabricante descritas en el **Anexo 1**, el LTC3588 está optimizado para recibir entradas de voltaje desde 2.7V hasta 20V, lo cual se adapta perfectamente a la fluctuante naturaleza del voltaje generado por los piezoeléctricos.

El LTC3588 también integra un regulador Buck DC/DC de alta eficiencia, permitiendo transformar de manera eficiente el voltaje recolectado a niveles adecuados para alimentar dispositivos electrónicos, como los sensores o batería en este proyecto. Además, incluye un modo de Ultra bajo consumo de corriente (UVLO), que acumula la energía en un capacitor hasta alcanzar niveles de voltaje adecuados para la transferencia segura a la carga. Debido a las razones descritas anteriormente se opta de forma directa usar el módulo LTC 3588.

Cabe destacar que los diodos rectificadores como el 1N4007 presentan una caída de voltaje aproximadamente de 0.7 V por cada diodo. En configuraciones como el puente de onda completa presenta una pérdida total de 1.4 V, lo cual es considerable en aplicaciones de generación como el prototipo piezoeléctrico propuesto, donde el voltaje generado es limitado. Con el objetivo de minimizar las perdidas por rectificación se optó por utilizar el módulo LTC 3588-1, el cual incorpora un puente rectificador interno con de pérdidas de 400mV en total, asimismo, incluye un regulador Buck que estabiliza la salida de voltaje a un voltaje de 3.6 V.

### 4.4.2. Batería o acumulador

En las primeras pruebas de funcionamiento del prototipo, se utilizó un condensador electrolítico de 1000uF a 16V como medio de almacenamiento temporal, sin embargo, se observó que, tras un tiempo de carga, el capacitor comenzaba a regresar la energía hacia el rectificador. Para evitar el retorno de la carga, se propuso incorporar de un diodo entre la salida del rectificador y el capacitor, con el fin de bloquear el retroceso de la energía. No obstante, el diodo tiene una caída de tensión de 0.7 V, lo que provocó una reducción en la cantidad de energía acumulada en el capacitor.

Tras analizar el comportamiento del circuito, se concluyó que los piezoeléctricos generan voltajes diferentes con cada pisada, por lo tanto, la salida del rectificador presenta voltajes variables, dichos valores son mayores a la carga inicial del capacitor (0 V), sin embargo, el voltaje almacenado en el capacitor aumenta, superando la salida del rectificador, dificultando el flujo de corriente y una carga óptima, limitando el aprovechamiento completo de la energía generada.

Ante esta limitación, se evaluaron alternativas más eficientes para el almacenamiento de energía y se procedió a la selección de una batería recargable de ion de litio (Li-ion) de 3.7v y 2500mAh, la cual es más viable utilizar con el módulo LTC 3588-1, diseñado para sistemas de recolección de energía piezoeléctrica. Esta batería permite almacenar energía a largo plazo, aunque requiera un mayor tiempo de carga, la integración mejora significativamente la autonomía del sistema.

Entre las ventajas se destacan su alta densidad energética, que optimiza la capacidad de almacenamiento, su eficiencia en los ciclos de carga y descarga garantiza un rendimiento estable y una vida útil prolongada. Además, su seguridad y estabilidad, al ser una batería Li-ion, la convierten en una opción confiable para proyectos que requieren un suministro de energía constante y seguro.

## 4.5. Circuito del generador piezoeléctrico y almacenamiento de energía

A continuación, se presenta un diseño representativo del generador piezoeléctrico y el circuito de rectificación, filtrado y almacenamiento de energía. En la Fig. 21 se puede observar el diseño completo del sistema piezoeléctrico.

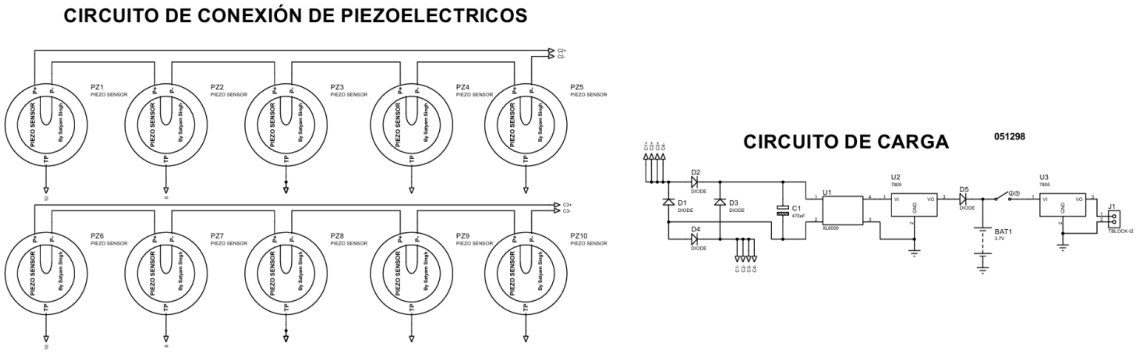



**Fig. 21. Diseño del generador piezoeléctrico y circuito de carga**

Este diseño ilustra de manera integral el proceso de conversión de la energía mecánica en energía eléctrica a través de dispositivos piezoeléctricos, abarcando desde la generación inicial hasta el acondicionamiento y almacenamiento final de la energía.

La representación gráfica del circuito, desarrollado mediante el software especializado Proteus, permite analizar detalladamente cada una de las etapas y optimizar el rendimiento del prototipo.

### 4.5.1. Circuito de conexión de los piezoeléctricos

El diseño del circuito electrónico del generador piezoeléctrico cuenta con 10 dispositivos piezoeléctricos conectados en paralelo, dado que este tipo de conexión permite obtener un voltaje más estable y adecuado para la etapa de rectificación.

En la Fig. 22 se puede observar un diseño representativo completo de dicha conexión, el cual fue desarrollado mediante el software Proteus 8 Professional como se mencionó anteriormente. Esta herramienta permitió realizar un diseño preciso del circuito, facilitando su análisis para una explicación detallada del prototipo.

## CIRCUITO DE CONEXIÓN DE PIEZOELECTRICOS

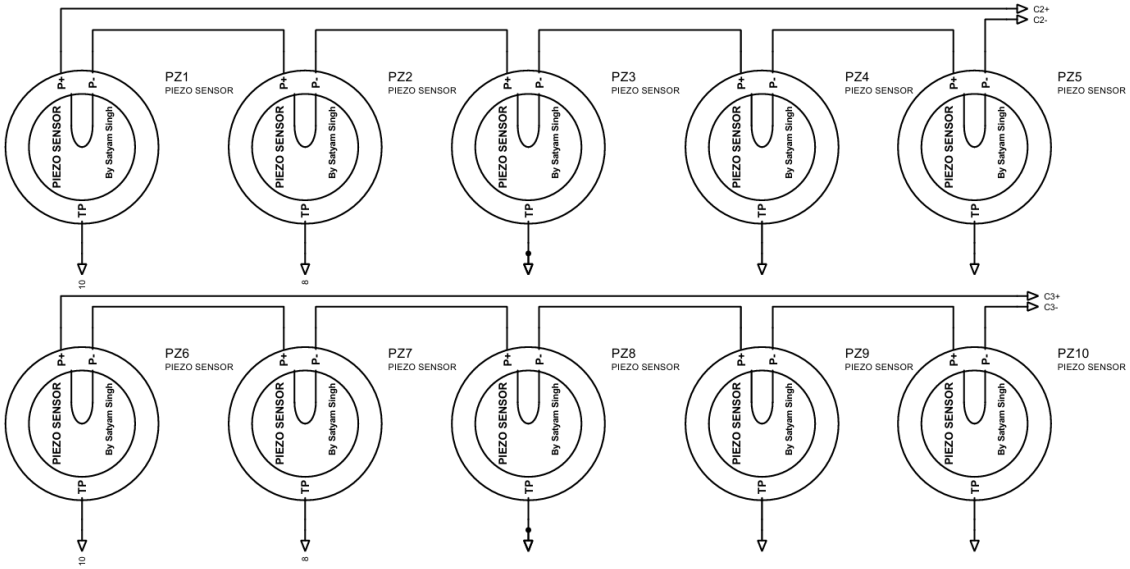



**Fig. 22. Conexión de piezoeléctricos en paralelo**

### 4.5.2. Circuito de almacenamiento de energía

El circuito representativo de la rectificación, filtrado y almacenamiento de la energía fue diseñado mediante el software Proteus, lo cual permitió generar una representación esquemática clara y detallada del sistema. Este diseño es fundamental para comprender el proceso de conversión de energía mecánica en energía eléctrica, así como del aprovechamiento de la energía generada por los dispositivos piezoeléctricos.

Partiendo de la generación de energía eléctrica a partir de los dispositivos piezoeléctricos, es necesario realizar diversas etapas para captar y almacenar la energía suficiente para su uso posterior, en la Fig. 23 se presenta el diseño representativo del circuito, donde se pueden identificar claramente cada una de las etapas y su conexión dentro del sistema.

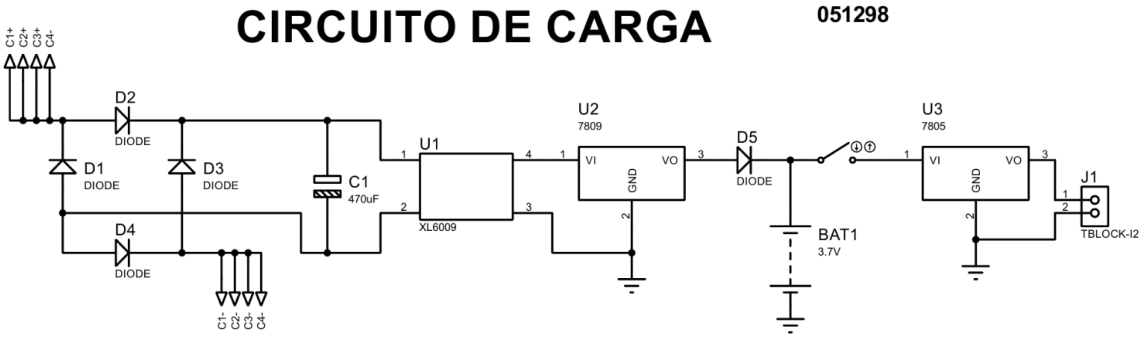



**Fig. 23. Diseño representativo de la etapa de rectificado, filtrado y almacenamiento**

En el presente diagrama representativo del circuito de carga diseñado en Proteus, ilustra las principales etapas del sistema encargado de gestionar la energía piezoeléctrica generada.

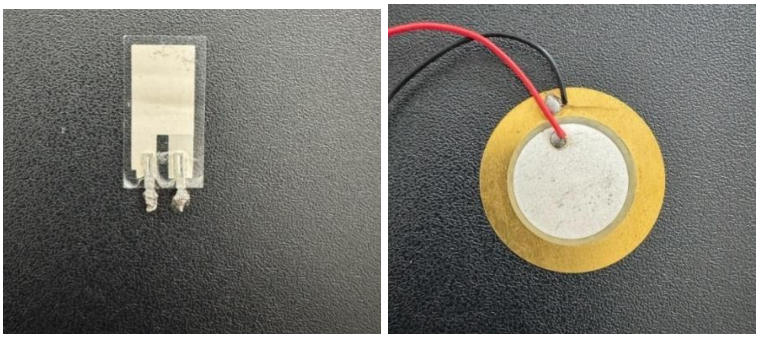
La primera etapa corresponde a la rectificación de la señal eléctrica generada a partir de los piezoeléctricos, la cual tiene como objetivo transformar la corriente alterna (AC) producida por la deformación del dispositivo en corriente continua (CC). Asimismo, se ilustra la etapa de filtrado y regulación con el fin de reducir las variaciones de voltaje y estabilizar la señal obtenida de la etapa de rectificado. Finalmente, la energía es transferida a una batería recargable de 3,7 V, donde se almacena para su uso posterior, garantizando su disponibilidad para futuras aplicaciones.

## 4.6. Implementación del prototipo

En la implementación del prototipo se realizó con la aplicación de los discos piezoeléctricos, así como con los piezoeléctricos flexibles, la conexión de los dispositivos se lo realizó en paralelo en ambos casos para optimizar la corriente generada.

### 4.6.1. Plantillas piezoeléctricas

La implementación del prototipo se llevó a cabo en diferentes fases; Inicialmente, se procedió con la selección y adquisición de los componentes electrónicos principalmente los piezoeléctricos, el circuito de carga, y los elementos de almacenamiento de energía. En las imágenes de la Fig. 24 A) y B) se puede aprecia el piezoeléctrico flexible y el disco piezoeléctrico cerámico. Debido a que se utilizó ambos dispositivos para el desarrollo del prototipo.



A) B)

**Fig. 24. A) Piezoeléctrico flexible de PVDF. B) Disco piezoeléctrico cerámico.**

Posteriormente, se realizó la instalación de los sensores piezoeléctricos en las plantillas. Para optimizar la corriente de salida del conjunto, se implementó una conexión en paralelo entre los sensores. Además, se llevó a cabo el montaje del circuito de carga y la conexión de los elementos de almacenamiento de energía. Es importante destacar que se incorporaron elementos flexibles en la instalación de los piezoeléctricos, permitiendo que estos tuvieran la libertad de deformarse y, por ende, generar un mayor voltaje. Este proceso culminó con la construcción del prototipo, el cual quedó listo para las pruebas.

### 4.6.2. Integración de los dispositivos piezoeléctricos

En la Fig. 25 A) se puede observar el montaje de los piezoeléctricos flexibles sobre una base de plantilla ergonómica. Se conectaron 16 de estos dispositivos en paralelo.

A) B)

**Fig. 25. A) Montaje de piezoeléctricos flexibles. B) Montaje con discos piezoeléctricos**

En la Fig. 25 B) se observa el montaje de los discos piezoeléctricos en un modelo de plantilla común, la cual fue fabricada mediante impresión 3D utilizando material flexible. Se obtuvo así una plantilla la cual cuenta con bases para la incorporación de los discos piezoeléctricos cerámicos, evitando daños provocados por la presión o fuerza aplicada de manera constante.

#### 4.6.2.1. Acoplamiento de plantilla con discos piezoeléctricos y plantilla con piezoeléctricos flexibles.

De esta forma, además de los piezoeléctricos flexibles, se agregó piezoeléctricos rígidos los cuales tienen resistencia y al sufrir deformaciones, su capacidad de generación es superior a los flexibles. Se opto por agregar ambos tipos de piezoeléctricos ya que se necesita tanto flexibilidad como rigidez para la generación de energía a través de este tipo de tecnología. En la Fig. 26 se puede apreciar ambas plantillas con sus respectivos piezoeléctricos conectados al sistema. Cabe recalcar que la plantilla 3D va entre la base y la plantilla ergonómica con arco, la cual permitió tener contacto con toda la superficie del pie, optimizando la generación de energía piezoeléctrica.

**Fig. 26. Integración de las plantillas al sistema.**

### 4.6.3. Sistema de almacenamiento y carga

En la Fig. 27 se observa la integración del sistema de carga descrito previamente, dicho sistema cuenta con una salida de 3.6V misma que es capaz de alimentar distintos elementos electrónicos.

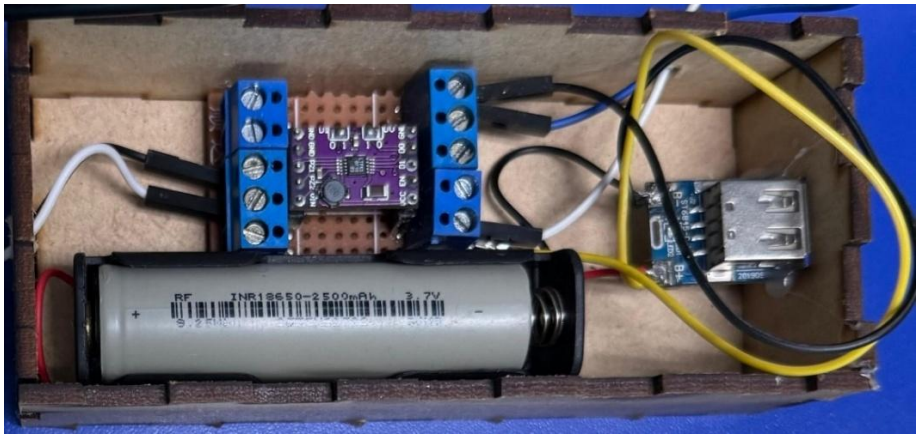


**Fig. 27. Circuito de carga y almacenamiento.**

### 4.6.4. Sistema de medición y captura de datos

Para el caso de la captura de datos se agregó un sistema de medición de voltaje y corriente con el fin de almacenar los datos para su integración en la descripción de las pruebas del prototipo.

Dicho sistema cuenta principalmente con un Arduino Mega, un pzem-017 DC, serial de comunicación rs485 y un lector de memoria microSD.

En la Fig. 28 se observa el sistema de medición y captura de datos con sus respectivos componentes electrónicos.

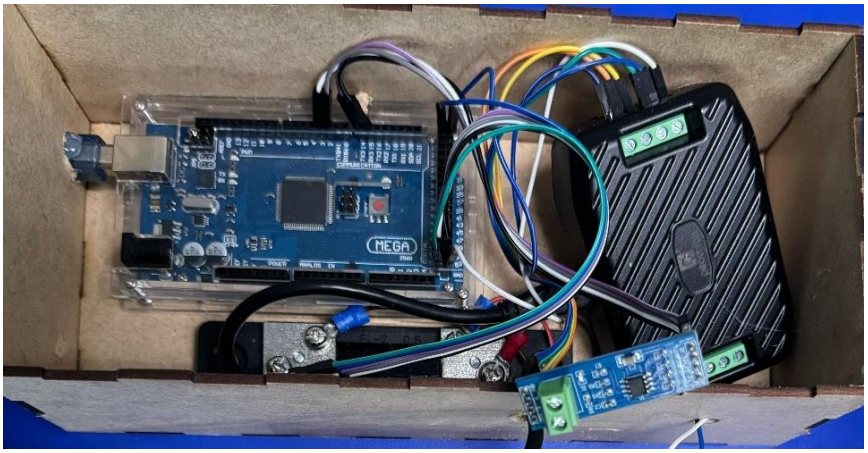


**Fig. 28. Sistema de medición y captura de datos.**

### 4.6.5. Integración final del prototipo

La integración final del prototipo implicó la interconexión de los componentes físicos y electrónicos para conformar el sistema funcional. En primer lugar, se procedió con la instalación de los dispositivos piezoeléctricos en las plantillas, asegurando su correcta ubicación para optimizar la captación de energía mecánica. Posteriormente, se realizó la conexión eléctrica del sensor de voltaje. Específicamente, se implementó una conexión en paralelo, buscando maximizar la corriente de salida generada por el conjunto de piezoeléctricos. A continuación, se llevó a cabo el montaje del circuito de carga, el cual se encarga de acondicionar la energía captada por los sensores piezoeléctricos. Adicional a ello se agregó un circuito que evalúa el voltaje generado por los piezoeléctricos a través de un microcontrolador Arduino en conjunto con el módulo. Finalmente, se realizó la conexión de los elementos de almacenamiento de energía al circuito de carga. Tras completar estas etapas, se obtuvo el prototipo finalizado, listo para ser sometido a las pruebas de funcionamiento

En la Fig. 29 se puede apreciar las imágenes del prototipo final, en la cual se realizó la integración de ambas plantillas para optimizar el rendimiento del sistema.

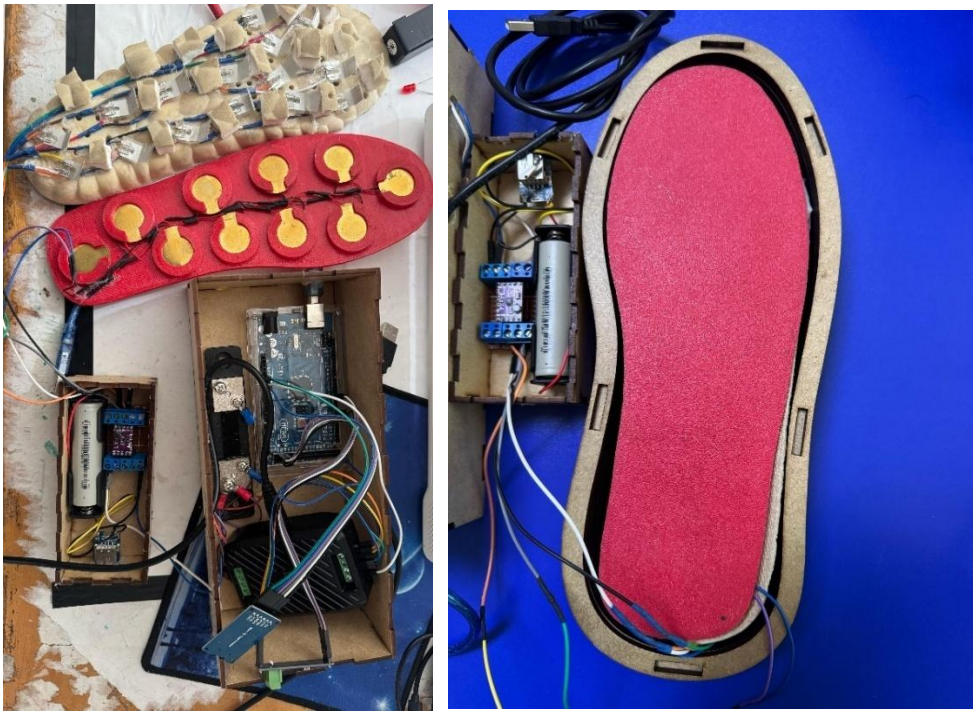


**Fig. 29. Integración final de prototipo.**

## 4.7. Cálculo de los parámetros eléctricos y mecánicos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las bases teóricas descritas en el apartado 3.5. Para ello, se realizaron cálculos matemáticos de los parámetros eléctricos y mecánicos del sistema. Asimismo, se empleó el software Matlab como herramienta de análisis detallado y preciso de los datos obtenidos, lo que permitió la interpretación cuantitativa de los resultados.

### 4.7.1. Medición de la masa corporal de los sujetos de prueba.

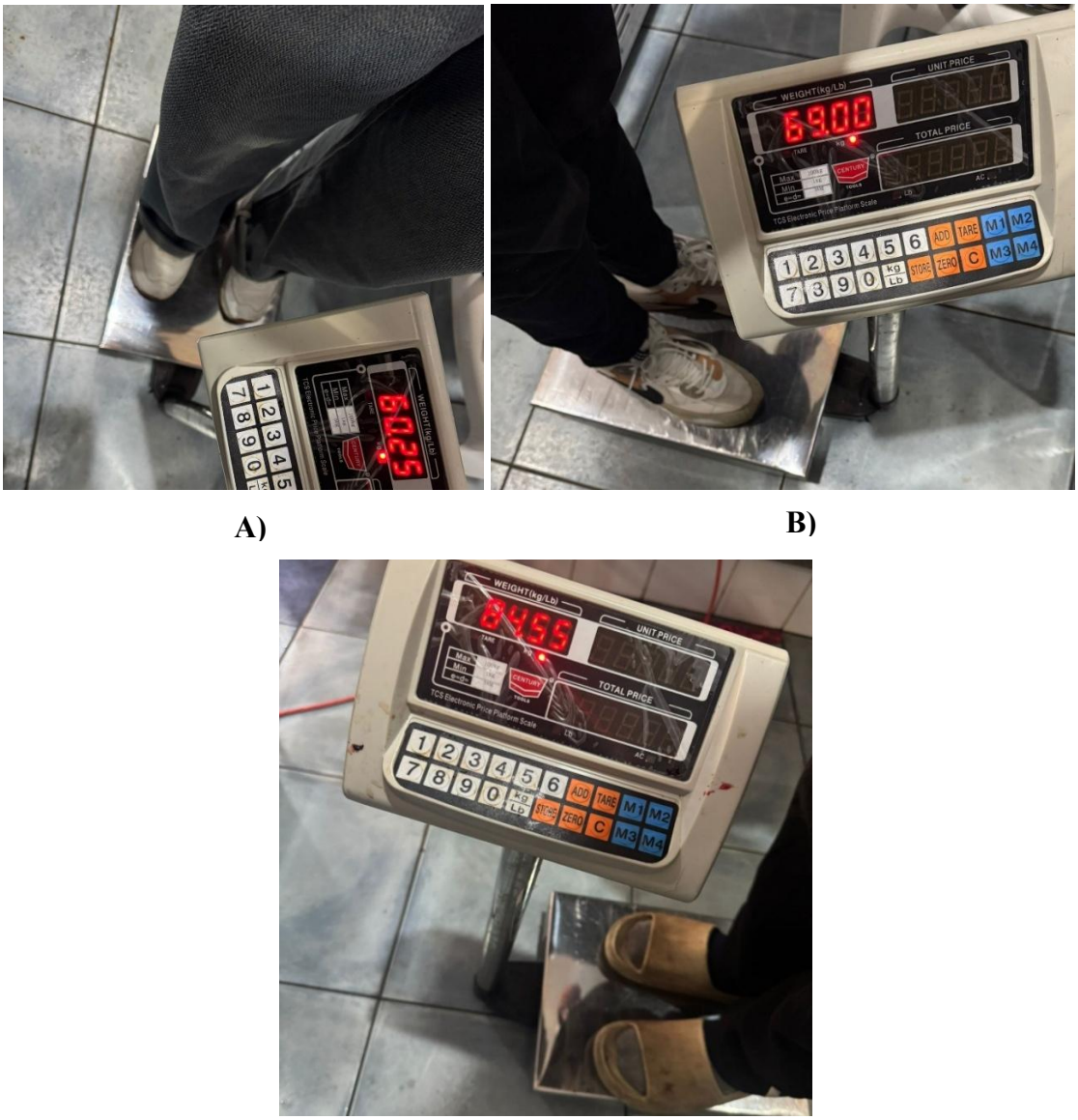
En el presente estudio se contó con la participación de tres sujetos de prueba, quienes colaboraron en la ejecución de las pruebas teóricas y experimentales del sistema propuesto.

La selección de tres sujetos responde a la necesidad de realizar un análisis preliminar, permitiendo evaluar la variabilidad en la energía generada bajo diferentes características físicas. Aunque una muestra más grande sería ideal para una mayor precisión, tres participantes ofrecen una representación suficiente para obtener estimaciones iniciales sobre el comportamiento del sistema. Este número de sujetos permite evaluar cómo la masa corporal, un factor clave en la fuerza aplicada durante la pisada, influye directamente en la eficiencia de los dispositivos piezoeléctricos. Además, la selección de tres sujetos facilita la ejecución controlada de las pruebas, considerando aspectos logísticos como tiempo y recursos disponibles, a la vez que se obtiene una diversidad suficiente para observar tendencias en la interacción entre las características físicas de los participantes y el rendimiento del sistema.

Con el fin de contar con parámetros físicos representativos, se procedió a la medición de la estatura y la masa corporal de cada uno de los participantes, este último parámetro influye directamente en la magnitud de la fuerza aplicada sobre los dispositivos piezoeléctricos durante la pisada. Estas mediciones permitieron establecer un marco de referencia cuantitativo para evaluar la interacción entre las características físicas de los participantes y el comportamiento del sistema.

Las masas correspondientes a cada sujeto de prueba se presentan en la Fig. 30, en los apartados A), B) y C), correspondientes al sujeto de prueba 1, sujeto de prueba 2 y sujeto

de prueba 3, respectivamente. Las mediciones fueron realizadas utilizando una balanza de piso digital calibrada, garantizando precisión en los valores registrados.




A) B)

C)

**Fig. 30. Masa corporal de los sujetos de prueba: A) Sujeto de prueba 1, B) Sujeto de prueba 2 y C) Sujeto de prueba 3**

Esta información es relevante, ya que la masa corporal influye directamente en la presión ejercida sobre el prototipo y, por tanto, en la cantidad de energía generada por los dispositivos piezoeléctricos durante el ciclo de pisada.

### 4.7.2. Generación de energía mediante los pasos humanos

Cada participante realizó una prueba continua de 30 segundos, un tiempo seleccionado para garantizar un balance entre la obtención de datos y el control del esfuerzo físico de los participantes. Este intervalo es lo suficientemente corto para mantener una intensidad constante en el ejercicio, lo que asegura mediciones precisas y consistentes de la cadencia y frecuencia de los pasos. Este período de tiempo fue elegido para realizar un análisis preliminar, donde la cantidad de pasos y la energía generada sean representativas sin necesidad de pruebas más largas que podrían ser más difíciles de controlar.

Se implementaron distintas actividades físicas a fin de analizar la variación en respuesta del prototipo piezoeléctrico bajo diferentes condiciones dinámicas. Se consideró que la fuerza generada por el peso corporal al correr presenta una magnitud superior en comparación con las actividades de caminar o trotar, debido al incremento de aceleración y al impacto durante la fase de contacto con el suelo. Esta diferencia en la fuerza mecánica aplicada induce una variación significativa en la deformación del material piezoeléctrico, lo que influye directamente en la tensión generada (V) y la energía generada por cada pisada (J).

Por esta razón, se seleccionaron tres tipos de actividades: caminata, trote y carrera, estas fueron seleccionados estratégicamente debido a las diferencias sustanciales en la magnitud de la fuerza ejercida sobre los dispositivos piezoeléctricos durante cada tipo de desplazamiento, cada actividad representa distintos niveles de fuerza aplicada y frecuencia de pasos.

En la TABLA XIV se presenta el número de pasos registrados por cada sujeto de prueba en los distintos modos de desplazamiento: caminata, trote y carrera. Cabe destacar que la cantidad de pasos pueden variar en función de factores individuales como la estatura y longitud de zancada de los participantes.

TABLA XIV

CANTIDAD DE PASOS POR TIPO DE DESPLAZAMIENTO

| Sujetos de prueba | Peso (Kg) | Estatura (m) | Tipo de desplazamiento | Tiempo (s) | Número de pasos |
|---|---|---|---|---|---|
| Sujeto 1 | 60.25 | 1.53 | Caminata | 30 | 40 |
| | | | Trote | | 56 |
| | | | Carrera | | 80 |
| Sujeto 2 | 69 | 1.64 | Caminata | 30 | 45 |
| | | | Trote | | 72 |
| | | | Carrera | | 93 |
| Sujeto 3 | 84.55 | 1.72 | Caminata | 30 | 52 |
| | | | Trote | | 84 |
| | | | Carrera | | 103 |

Las variaciones en la cantidad de pasos entre los sujetos de prueba se deben a las diferencias individuales en la longitud de zancada, estatura y ritmo del tipo de actividad realizada.

Los datos de la TABLA XIV fueron utilizados posteriormente para calcular parámetros como la distancia recorrida y la velocidad promedio, las cuales inciden directamente en el comportamiento del sistema piezoeléctrico.

Asimismo, como se mencionó anteriormente, se determinaron variables relevantes tales como la distancia recorrida (m) y la velocidad (m/s), aplicando las ecuaciones (17), (18) y (21), correspondiente al cálculo de longitud de paso, distancia total y velocidad. Estos valores fueron realizados a partir de la estatura de cada sujeto, el número de pasos registrados y el tiempo total de prueba.

Los resultados obtenidos a partir de dichos cálculos se presentan de forma consolidada en la TABLA XV, la cual resume la relación entre el tipo de desplazamiento, la cantidad de pasos, la longitud de paso, la distancia recorrida y la velocidad desarrollada por cada sujeto durante las pruebas experimentales.

TABLA XV

PARÁMETROS POR SUJETO Y TIPO DE DESPLAZAMIENTO

| Sujetos de prueba | Actividad | Estatura (m) | Longitud de paso (m) | Distancia (m) | Tiempo de un paso (s) | Velocidad (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Caminar | | 0.6273 | 25.092 | 0.75 | 0.3864 |
| Sujeto 1 | Trotar | 1.53 | 0.9945 | 55.692 | 0.5357 | 1.8564 |
| | Correr | | 1.1934 | 95.472 | 0.375 | 3.1824 |
| | Caminar | | 0.6724 | 30.258 | 0.6667 | 1.0086 |
| Sujeto 2 | Trotar | 1.64 | 1.066 | 76.752 | 0.4167 | 2.5584 |
| | Correr | | 1.2792 | 118.9656 | 0.3225 | 3.9655 |
| | Caminar | | 0.052 | 36.6704 | 0.5769 | 1.2223 |
| Sujeto 3 | Trotar | 1.72 | 1.118 | 93.912 | 0.3571 | 3.1304 |
| | Correr | | 1.3418 | 138.1848 | 0.2912 | 4.6061 |

El recuento de pasos obtenidos en la TABLA XIV durante las pruebas permitió establecer valores promedio representativos para cada tipo de desplazamiento. En el caso de la caminata, se registró un promedió 45,6 en 30 segundos, lo que se redondeó a 45 pasos para fines de análisis. Durante el trote, el promedio fue de 70,6 en 30 segundos, lo que se redondeó a 70 pasos, mientras que en la carrera se alcanzó un promedio de 92 pasos en el mismo intervalo de tiempo.

Una vez obtenido los valores promedio del número de pasos registrados durante las pruebas experimentales, se procedió a calcular la frecuencia de pasos por minuto utilizando la ecuación (19). Posteriormente, con estos valores, se aplicó la regla de tres simple para determinar el tiempo promedio requerido para realizar un paso por parte de los participantes en cada tipo de desplazamiento (caminar, trotar y correr).

Con estos datos, se calculó la frecuencia de pasos en Hertz (Hz), Aplicando la ecuación (20). Los resultados obtenidos a partir de estos cálculos se presentan en la TABLA XVI, donde se detalla valores promedio de pasos, frecuencia de pasos por minuto, tiempo en dar un paso y la frecuencia de paso en Hertz (Hz) anteriormente mencionado.

TABLA XVI

VALORES DE FRECUENCIA DE PASOS POR MINUTO Y TIEMPO EN REALIZAR UN PASO

| Tipo de desplazamiento | Tiempo (s) | Número de pasos promedio | Pasos por minuto | Tiempo en dar un paso (s) | Frecuencia de pasos (Hz) |
|---|---|---|---|---|---|
| Caminar | 30 | 45 | 90 | 0.6667 | 1.5 |
| Trotar | 30 | 70 | 140 | 0.4286 | 2.3333 |
| Correr | 30 | 92 | 184 | 0.3260 | 3.0667 |

Como se puede observar en TABLA XVI, con un promedio de 45 pasos en la caminata se obtiene una frecuencia de pasos media de 1,5 Hz, es decir, 1,5 pasos por segundo. En el caso del trote, con un promedio de 70 pasos, se obtiene una frecuencia de 2,3 Hz, mientras que, en la carrera con 92 pasos en promedio, la frecuencia asciende a 3 Hz.

Con los valores referenciales establecidos, se utilizó un metrónomo digital para controlar la frecuencia de pisadas. Se configuró la cadencia de pasos por minuto sincronizando cada pisada con el sonido del metrónomo, ayudando a mantener el mismo ritmo entre todos los participantes. Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de desplazamientos fueron: cadencia de 90 pasos al caminar, cadencia de 140 pasos al trotar y una cadencia de 184 pasos al correr.

A partir de los valores promedio detallados en la TABLA XVI, se aplicó la ecuación (1) para determinar la potencia generada a partir del impacto mecánico producido por los pasos humanos. Este cálculo se basa en los valores de potencia estimada para cada tipo de desplazamiento (caminar, trotar y correr) en función del peso del sujeto de prueba.

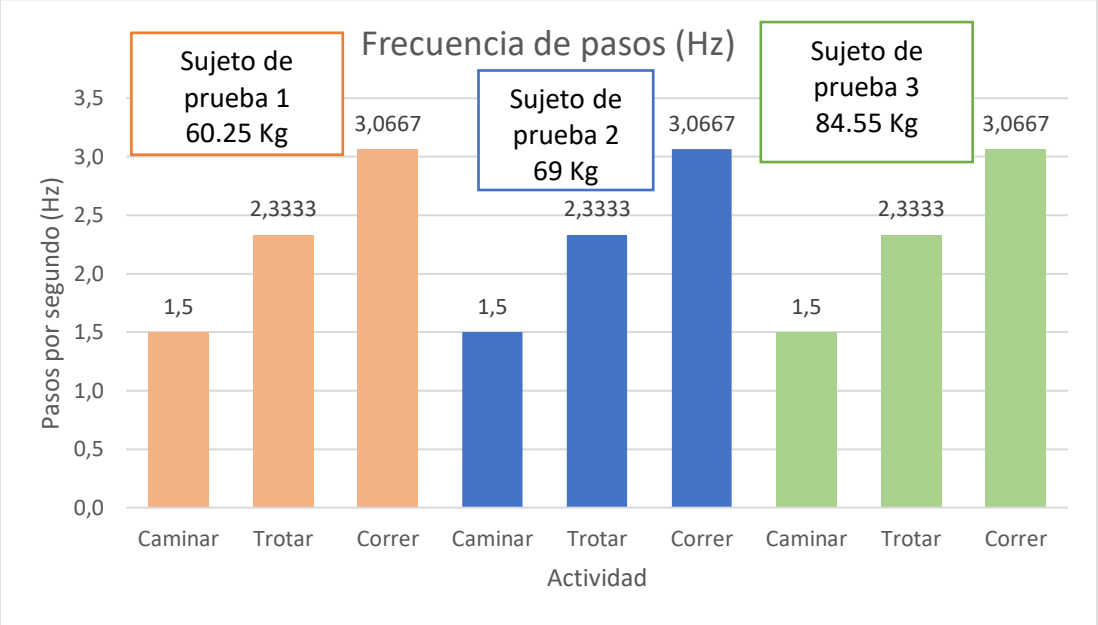
Los resultados obtenidos se presentan de forma consolidada en la TABLA XVII, donde se detalla la potencia generada para cada sujeto de prueba, considerando frecuencias de paso de 1,5 Hz, 2,3 Hz y 3 Hz, correspondientes a las actividades de caminar, trotar y correr respectivamente.

**TABLA XVII**

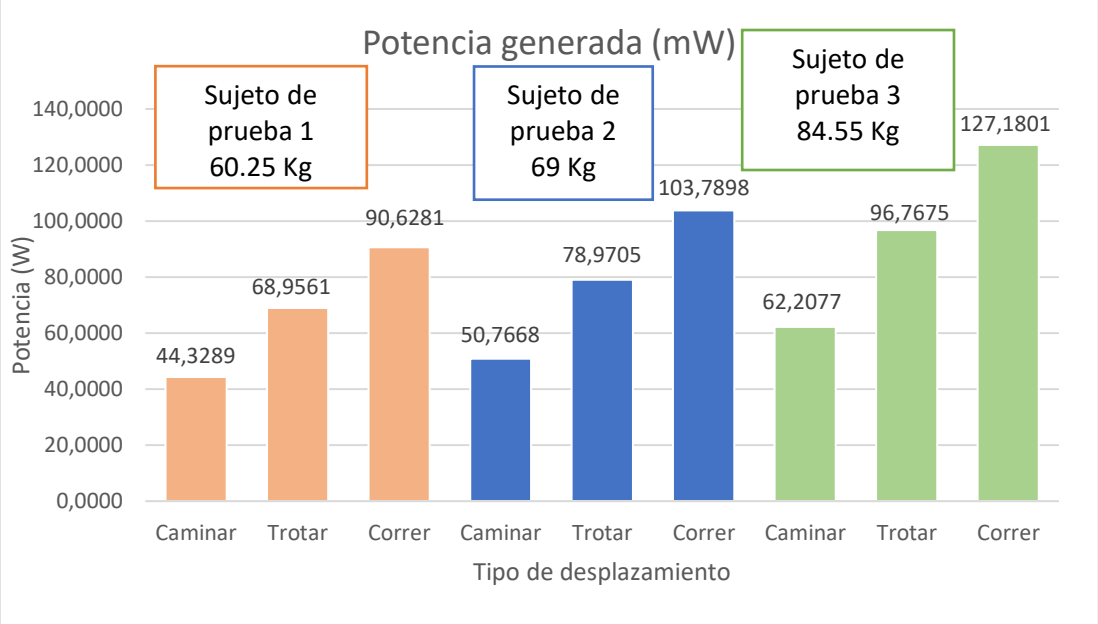
**POTENCIA GENERADA POR PASOS**

| Sujetos de prueba | Peso (Kg) | Tipo de desplazamiento | Número de pasos promedio | Frecuencia de pasos (Hz) | Potencia generada (mW) |
|---|---|---|---|---|---|
| Sujeto 1 | 60.25 | Caminata | 45 | 1.5 | 44.3289 |
| | | Trote | 70 | 2.3333 | 68.9561 |
| | | Carrera | 92 | 3.0667 | 90.6281 |
| Sujeto 2 | 69 | Caminata | 45 | 1.5 | 50.7668 |
| | | Trote | 70 | 2.3333 | 78.9705 |
| | | Carrera | 92 | 3.0667 | 103.7898 |
| Sujeto 3 | 84.55 | Caminata | 45 | 1.5 | 62.2077 |
| | | Trote | 70 | 2.3333 | 96.7675 |
| | | Carrera | 92 | 3.0667 | 127.1801 |

Estos resultados demuestran que la potencia generada se incrementa con el aumento de peso corporal y la frecuencia de pasos (Hz). De igual forma, en la Fig. 31 A) y B) se presenta una gráfica de los resultados obtenidos a partir de los valores descritos en la TABLA XVII. La frecuencia de la pisada se mantiene constante para cada actividad. Sin embargo, la potencia generada aumenta con el peso, ya que está directamente relacionado con este. Además, la potencia varía según la actividad, siendo mayor al correr que al trotar o caminar.




**A)**




**B)**

**Fig. 31 A) Frecuencia de pasos. B) Potencia generada**

En el trabajo de investigación "Ultra-High Power Density Roadway Piezoelectric Energy Harvesting System" se puede observar una relación clara en lo que respecta a la cantidad de peso y fuerza aplicada sobre un material piezoeléctrico y la cantidad de

energía que se puede generar en Joules, esto contrasta los resultados obtenidos en la Fig. 30 donde se observa que, a mayor peso la cantidad de potencia generada es mayor. [53]

### 4.7.3. Cálculo de la energía generada por pasos (J)

Con los datos de la TABLA XVII de la potencia obtenida, se procedió a determinar la energía generado en Julios (J). Para el cálculo de la energía generada por pasos en Julios (J) se utilizó la ecuación (22), Este cálculo permite estimar la cantidad de energía mecánica transferida al sistema piezoeléctrico como resultado de las pisadas repetitivas sobre el prototipo. En la TABLA XVIII se detallan los resultados obtenidos.

**TABLA XVIII**

**GENERACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA (J) MEDIANTE PASOS HUMANOS**

| Sujetos de prueba | Tipo de desplazamiento | Potencia generada por pasos (mW) | Energía generada por pasos (mJ) |
|---|---|---|---|
| Sujeto 1 | Caminata | 44.3259 | 1329.7794 |
| | Trote | 68.9669 | 2069.0088 |
| | Carrera | 90.6497 | 2719.4916 |
| Sujeto 2 | Caminata | 50.7633 | 1522.9009 |
| | Trote | 78.9829 | 2369.4872 |
| | Carrera | 103.8146 | 3114.4385 |
| Sujeto 3 | Caminata | 62.2035 | 1866.1054 |
| | Trote | 96.7826 | 2903.4804 |
| | Carrera | 127.2105 | 3816.3156 |

Los resultados obtenidos muestran un aumento progresivo de la energía generada en función del peso de la persona y el tipo de desplazamiento. La mayor cantidad de energía fue generada por el sujeto de prueba 3 con un peso de 84.55 Kg, durante la actividad de correr, alcanzando un total de 3816.31 mJ, mientras que el valor más bajo se registró en la caminata del sujeto de prueba 1 generando 1329.79 mJ.

### 4.7.4. Cálculo del efecto piezoeléctrico

Se calculó la densidad de carga generada al caminar, trotar o correr. En este cálculo no se consideraron variaciones de cada tipo de desplazamiento, ya que en todas las pruebas se empleó un metrónomo digital, el cual se explicó en la sección 4.2.2 de este capítulo, lo que garantizó la misma frecuencia de pasos entre los participantes.

Como resultado los valores obtenidos de la densidad de carga fueron los mismos para cada sujeto, dependiendo de su peso corporal. Estos valores se calcularon aplicando la ecuación (2), de igual forma, para encontrar la fuerza (N), área del PZT (m), presión ejercida por la persona se aplicó las ecuaciones (11), (12) y (23). utilizando los valores especificados en la ficha técnica del piezoeléctrico. Dichos valores resultantes se muestran en la TABLA XIX.

**TABLA XIX**

**VALORES OBTENIDOS DEL CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE CARGA**

| Peso (Kg) | Actividad | Fuerza aplicada (N) | Área del PZT (m^2) | Presión mecánica (N/m^2) | Densidad de carga (C/m^2) |
|---|---|---|---|---|---|
| 60.25 | Caminar<br>Trotar<br>Correr | 591.05 | | 1.03E+06 | 4.75E-04 |
| 69 | Caminar<br>Trotar<br>Correr | 676.89 | 5.73E-04 | 1.18E+06 | 5.44E-04 |
| 84.55 | Caminar<br>Trotar<br>Correr | 829.44 | | 1.45E+06 | 6.66E-04 |

A medida que el peso de la persona aumenta, también lo hace la densidad de carga generada sobre el material piezoeléctrico. Como resultado el sistema piezoeléctrico responde generando una mayor densidad de carga eléctrica ($C/m^2$), siendo un mejor aprovechamiento energético en sujetos de mayor peso.

### 4.7.5. Variación de la presión ejercida por una persona.

La variación de la presión depende tanto de la zona de la planta del pie como del área total del mismo, tal como se observa en la Fig. 32 A) y B), los resultados obtenidos se obtuvieron a partir de la ecuación (23), la cual describe la relación entre la fuerza ejercida sobre un área.

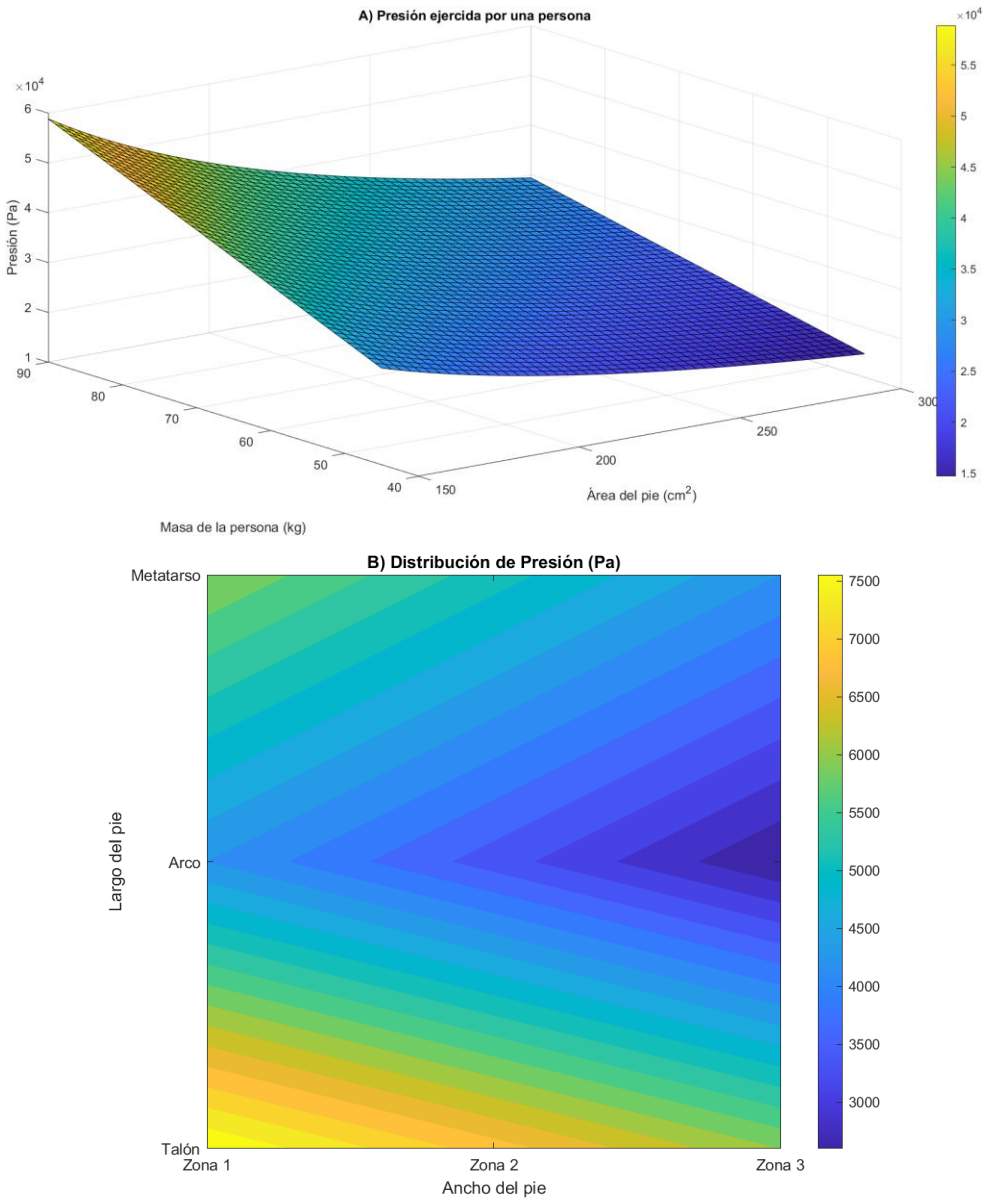



**Fig. 32. A) Presión ejercida con diferentes pesos. B) Presión ejercida en diferentes zonas del pie.**

En la Fig. 32 A) la presión generada en la planta del pie al caminar o al estar de pie se distribuye de manera no uniforme, en este caso se asumió una variación de presión debido a que las zonas donde se asienta el pie no son del todo lisas

En la Fig. 32 B) se presenta una distribución relativa de la presión utilizada para simular cómo se reparte la fuerza ejercida sobre el pie en diferentes zonas: talón, arco y metatarso (Incluido dedos). Se puede observar cómo la variación de la presión influye directamente en el área de contacto y la zona donde se manifiesta. Durante la marcha, el talón genera una mayor presión debido a su posición estratégica en la planta del pie, ya que es la principal zona de absorción del impacto del cuerpo contra la superficie. Esta mayor presión en el talón implica que el material piezoeléctrico experimentará una deformación más significativa en comparación con otras zonas del pie. Por lo tanto, la ubicación más adecuada para instalar los dispositivos piezoeléctricos es la zona del talón.

Los resultados obtenidos pueden ser contrastados con el trabajo de investigación "A Piezoelectric Energy-Harvesting Shoes System for Podiatric Sensing" en donde se observa que la mayor cantidad de fuerza que se ejerce es en el talón en comparación a otras zonas del pie, esto contrasta con los resultados obtenidos en la Fig. 14 que describen la misma situación, sin embargo, para aprovechar toda la cantidad de energía que la pisada puede producir se considera ubicar piezoeléctricos que cubran toda el área de la plantilla.

### 4.7.6. Cálculo de la generación de voltaje

A partir de las ecuaciones descritas en la sección 3.5 en el capítulo anterior que engloban la tensión eléctrica por la deformación y la potencia generada por el material piezoeléctrico se realizaron los cálculos matemáticos correspondientes. Dichos resultados se obtuvieron a partir de los datos técnicos del dispositivo piezoeléctrico descritos en la TABLA V, reemplazando en la ecuación (4), se obtuvo el voltaje piezoeléctrico en función de la fuerza.

Se propone aplicar la fuerza que ejercen cada uno de los participantes con pesos de: 60.25 Kg, 69Kg y 84.55 Kg. Para determinar la fuerza ejercida medida en Newtons sobre el piezoeléctrico, se utilizó los datos de la TABLA XIX. De esta forma con la ecuación (4), se obtuvieron los siguientes resultados que se muestra en la TABLA XX.

**TABLA XX**

**VOLTAJE GENERADO POR FUERZA APLICADA**

| Sujetos de prueba | Peso (kg) | Fuerza (N) | Voltaje (V) |
|---|---|---|---|
| Sujeto 1 | 60.25 | 591.0525 | 2.0646 |
| Sujeto 2 | 69 | 676.89 | 2.3645 |
| Sujeto 3 | 84.55 | 829.4355 | 2.8973 |

Con los datos resultantes de la **TABLA XX**, se aprecia que al incrementar el peso corporal se produce un aumento proporcional en los niveles de tensión generados, lo cual es consistente con el principio de que una mayor fuerza de contacto sobre los dispositivos piezoeléctricos provoca una deformación más pronunciada y, por ende, genera un voltaje mayor. Para ilustrar este comportamiento, se graficaron las variaciones de voltaje generado con pesos de 60,25 kg, 69 kg y 84.55 Kg utilizando Matlab. Las gráficas de la Fig. 33 en los apartados A), B) y C) correspondiente a los sujetos de prueba, muestran como el voltaje generado por el sistema piezoeléctrico aumenta dependiendo del peso y fuerza aplicado.

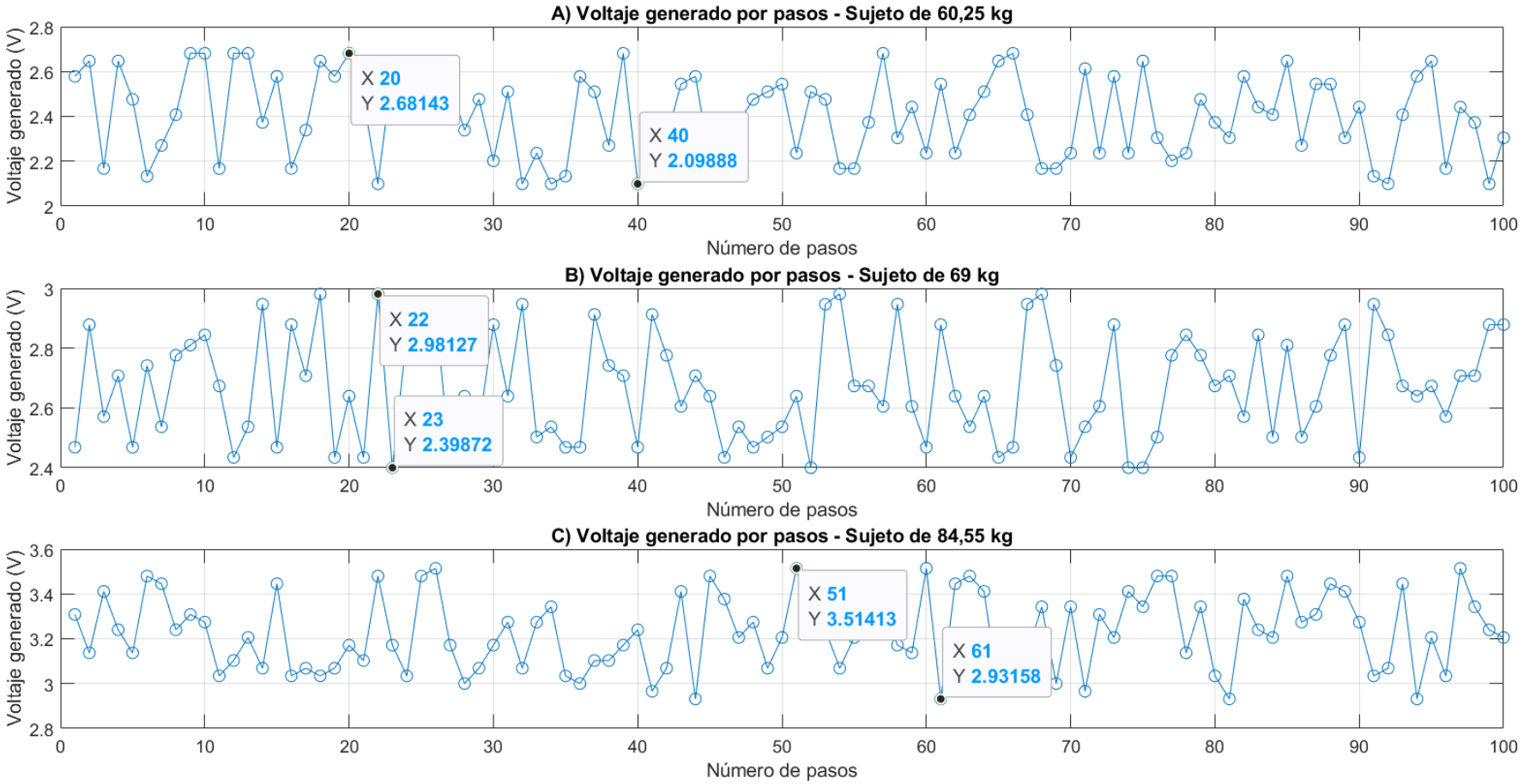



**Fig. 33. A) Voltaje generado por paso – sujeto de 60,25 kg. B) Voltaje generado por paso – sujeto de 69 kg. C) Voltaje generado por paso– sujeto de 84.55 kg.**

En la Fig. 33, apartados A), B) y C) se muestra la variación de voltaje generado dependiendo del peso aplicado con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz. Se observa que los pasos dados por sujetos con pesos de 60.25 kg, 69 kg y 84,55 kg generan voltaje en rangos diferenciados, lo cual confirma que la cantidad de energía piezoeléctrica generada depende directamente del peso y fuerza ejercida sobre el material.

Los resultados obtenidos pueden ser comparados con el trabajo de investigación "Desarrollo de alfombra recolectora de energía mediante la aplicación de cosecha de energía (ENERGY HARVESTING) utilizando dispositivos piezoeléctricos para el ahorro de consumo de energía eléctrica" en donde el autor muestra en sus resultados que al posicionarse alguien con un mayor peso sobre la alfombra recolectora esta genera una mayor cantidad de voltaje.

### 4.7.7. Cálculo de la generación de corriente

Para este apartado de utilizó las ecuaciones (5) , (6) y (7), que abarcan el modelado matemático para el cálculo de la corriente generada por el piezoeléctrico. Dichos resultados se obtuvieron a partir de los valores anteriormente calculados y valores técnicos del dispositivo piezoeléctrico, obteniendo los siguientes resultados descritos en la Fig. 33, apartados A), B) y C), donde se detallan la corriente eléctrica generada por los 3 sujetos de pruebas, con pesos de 60,25 kg, 69 kg y 84,55 kg.

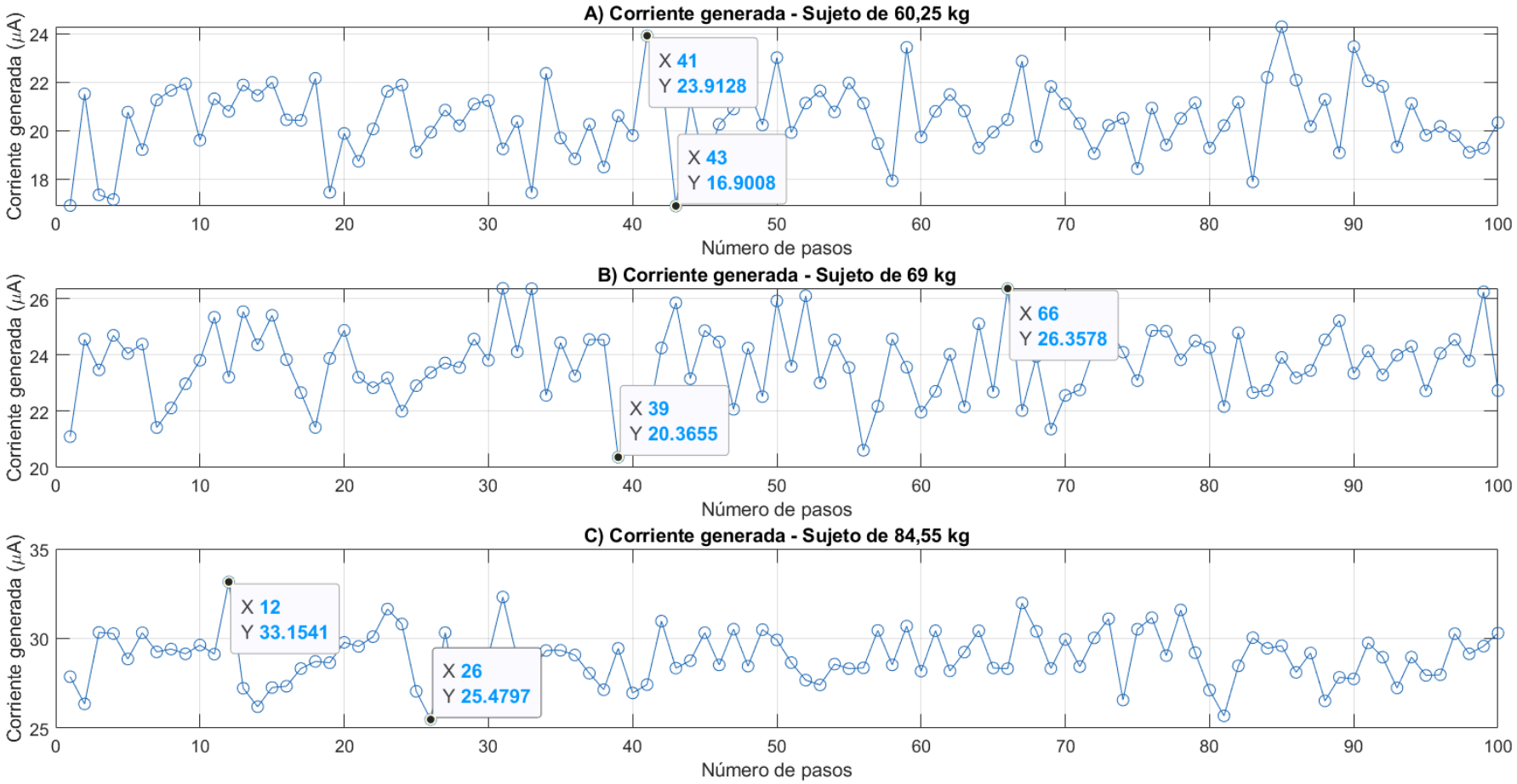



**Fig. 34. A) Corriente generada por paso – sujeto de 60,25 kg. B) Corriente generada por paso – sujeto 69 kg. C) Corriente generada por paso – sujeto de 84,55 kg.**

la Fig. 34, aparatados A), B) y C) refleja la variación de la corriente eléctrica generada con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz, la cual varía entre 16.9 uA(microamperios) a 33,1 uA (microamperios) aproximadamente. De igual forma, en la misma Fig. 34 se puede apreciar la generación de corriente eléctrica por pasos dependiendo del peso aplicado, sin embargo, la cantidad de corriente eléctrica producida es esencialmente pequeña. Debido a que el efecto piezoeléctrico convierte la deformación mecánica en pulsos de alto voltaje, pero de baja corriente, además, el material piezoeléctrico posee una alta impedancia interna. En consecuencia, a pesar de aplicar pesos de 84.55 Kg se obtiene una corriente resultante que oscila entre 25.4 uA a 33,1 uA aproximadamente, tal como se puede apreciar en la Fig. 34 apartado C).

## 4.8. Pruebas de funcionamiento del prototipo

Las pruebas de funcionamiento del prototipo se realizaron con 3 sujetos de prueba con diferentes pesos: 60.25 Kg, 69 Kg y 84.55 kg, los datos de la generación de voltaje resultante se obtuvieron al realizar las pruebas experimentales con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz.

### 4.8.1. Señal de entrada AC obtenida del prototipo

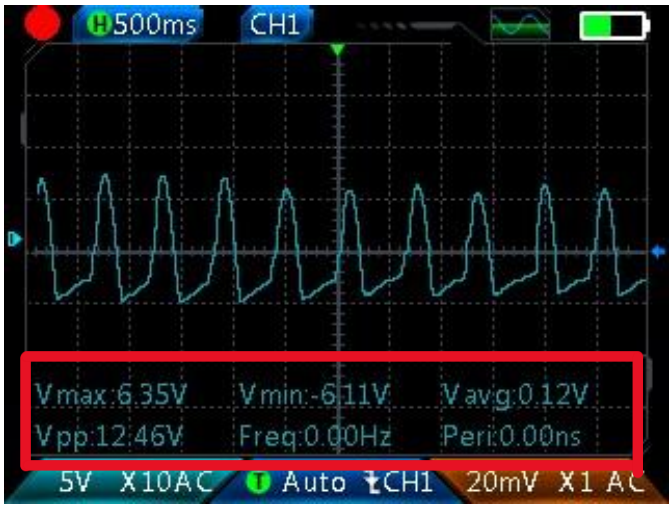



**Fig. 35. Señal AC generada de las plantillas piezoeléctricas**

La señal de entrada obtenida es de corriente alterna (AC). Tanto la plantilla con los piezoeléctricos flexibles como la plantilla con los discos piezoeléctricos cerámicos se

conectaron en paralelo, de tal forma que se obtuvo una única señal, como se puede observar en la Fig. 35, asimismo, en el recuadro rojo se puede apreciar los valores de generación voltaje AC.

### 4.8.2. Señal en la etapa de rectificación

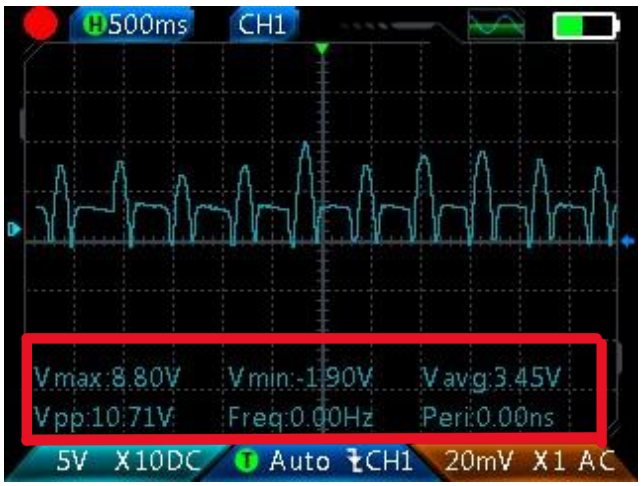



**Fig. 36. Señal DC en la etapa de rectificación de las plantillas piezoeléctricas**

En la Fig. 36 se observa la señal rectificada que es generada por ambas plantillas piezoeléctricas. La señal obtenida es de corriente continua (DC), es decir, la señal de corriente alterna (AC) obtenida previamente pasa por una etapa de rectificación que la convierte en una señal de corriente continua (DC). De igual forma, los valores de generación de voltaje se pueden observar en el recuadro rojo de la misma figura.

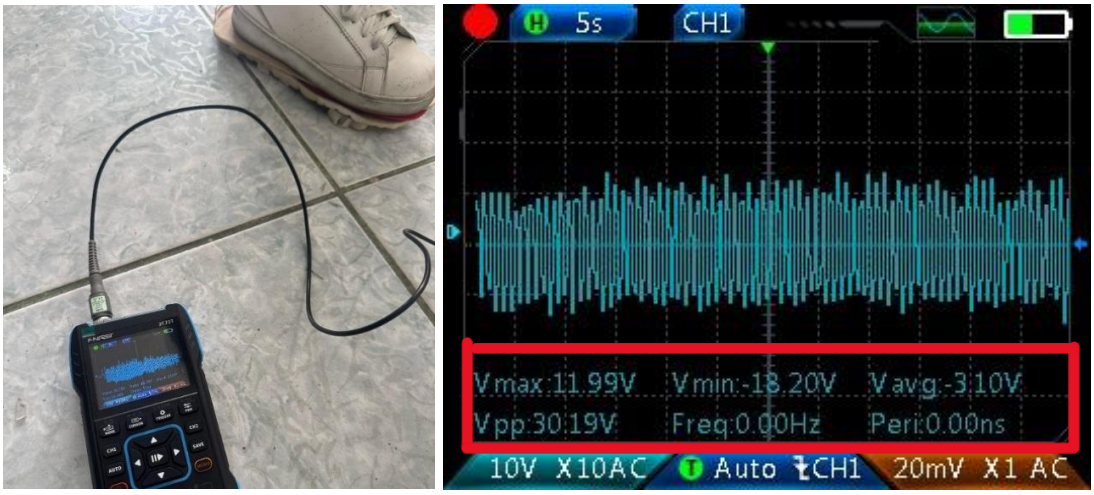
### 4.8.3. Generación de voltaje AC con frecuencia de 1,5 pasos por segundo en el prototipo desconectado del sistema de control y captura de datos

Para la generación de voltaje se contó con 3 sujetos de prueba con diferentes pesos: 60.25 Kg, 69 kg y 84.55 Kg. Las pruebas experimentales se realizaron con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz.

Inicialmente, se realizaron las pruebas de generación de voltaje del prototipo mientras permanecía desconectado del sistema de carga, almacenamiento, sistema de captura y medición de datos. El objetivo fue evaluar el valor del voltaje generado a partir de una frecuencia de 1,5 pasos por segundo. Para las mediciones, se empleó un osciloscopio que

permitió visualizar los picos de voltaje producidos a partir de las deformaciones en los dispositivos piezoeléctricos.

#### 4.8.3.1. Sujeto de prueba 1, peso 60.25 Kg

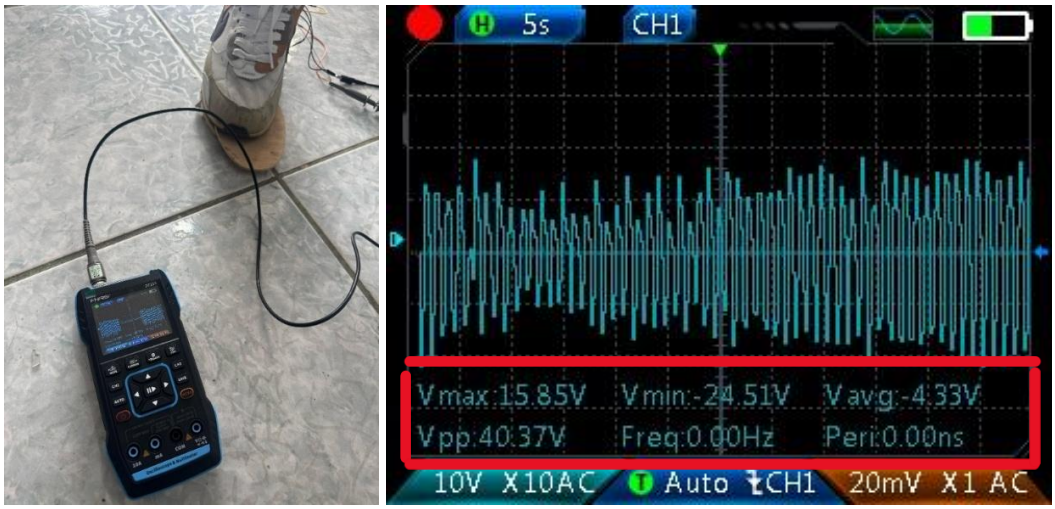



**A)** **B)**

**Fig. 37. Pruebas de voltaje, sujeto 1 con peso de 60.25 kg. B) Señal de voltaje generado, peso 60.25 Kg.**

Como se observa en la Fig. 37 , apartados A) y B), las pruebas se realizaron con una frecuencia de 1,5 pasos por segundo. El valor del voltaje generado por las plantillas piezoeléctricas se encuentra en el recuadro de color rojo en la Fig. 37 B).

#### 4.8.3.2. Sujeto de prueba 2, peso 69 Kg

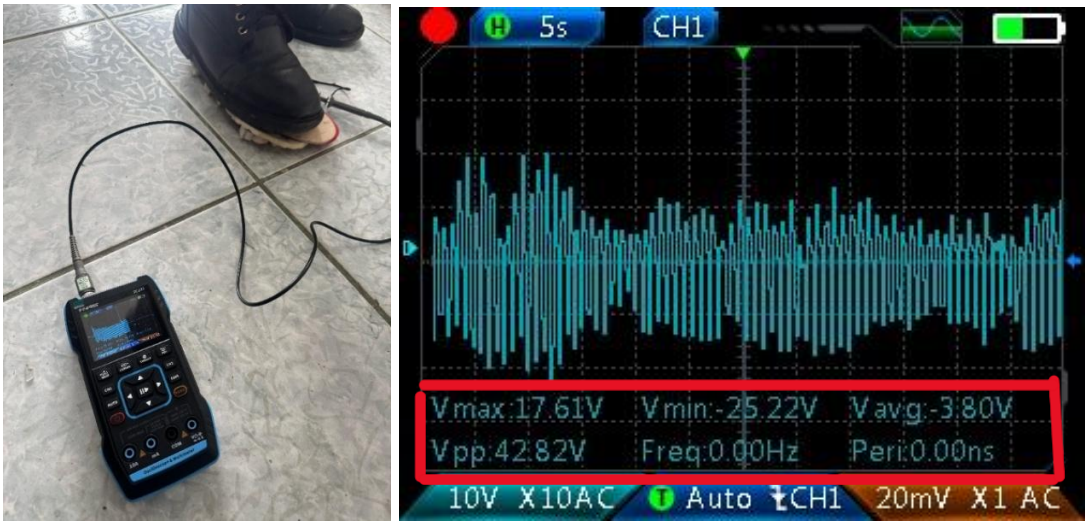



**A)** **B)**

**Fig. 38. A) Pruebas de voltaje sujeto 2, peso 69 kg. B) Señal de voltaje generado, peso 69 Kg**

Como se observa en la Fig. 38 A), la prueba de generación de voltaje se realizó con el sujeto de prueba 2, manteniendo la misma frecuencia de pasos de 1,5 Hz. En la Fig. 38 B) se aprecia la señal de voltaje generada por dicho sujeto, además, los valores correspondientes se encuentran destacados en el recuadro rojo de la misma figura.

#### 4.8.3.3. Sujeto de prueba 3. Peso 84.55 Kg




**A)** **B)**

**Fig. 39. A) Pruebas de voltaje sujeto 3, peso 84.55 kg. B) Señal de voltaje generado, peso 84.55 Kg.**

Como se observa en la Fig. 39 A), las pruebas de generación de voltaje con el sujeto de prueba 3 se realizaron manteniendo la misma frecuencia de 1,5 pasos por segundo. Asimismo, en la Fig. 39 B) se aprecia la señal de voltaje generada, y los valores correspondientes se encuentran en el recuadro rojo de dicha figura.

Las pruebas demuestran que tiene relación lo descrito en la sección 4.2 del capítulo, en donde se describe que el voltaje generado por una persona con mayor peso es mayor que el generado por una persona con un peso menor.

### 4.8.4. Generación de voltaje DC con frecuencia de 1,5 pasos por segundo en el prototipo conectado a los sistemas de carga y captura de datos

En esta etapa se analizó el comportamiento del prototipo piezoeléctrico al estar conectado a los sistemas de carga, almacenamiento, captura y medición datos. Las pruebas se realizaron manteniendo una frecuencia constante de 1.5 pasos por segundo. Para las mediciones de voltaje se utilizaron las lecturas del dispositivo PZEM-DC017,

obtenidas a partir de las deformaciones provocadas en los elementos piezoeléctricos por tres sujetos de prueba, con pesos de 60.25 Kg, 69 kg y 84.55 kg.

#### 4.8.4.1. Voltaje generado en el sistema piezoeléctrico, sujeto 1 de 60.25 Kg

Como se observa en la Fig. 40 A), se llevaron a cabo pruebas experimentales de generación de voltaje con el sujeto 1, cuyo peso es de 60.25 Kg. Este aplicó pisadas sobre el sistema piezoeléctrico con una frecuencia de 1,5 Hz, registrando el voltaje generado con cada impacto.

**A)**

**B)**

**Fig. 40. A) Prueba de voltaje generado por el sujeto 1, peso 60.25 kg. B) Gráfica del voltaje generado por el sujeto 1, peso 60.25 kg.**

Como se aprecia en la Fig. 40 B), durante las pruebas del sujeto 1 con un peso de 60.25 Kg, el sistema piezoeléctrico evidenció un incremento progresivo del voltaje DC conforme aumentaba el número de pasos. Con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz, el voltaje alcanzó un máximo de 1,7 V aproximadamente.

### 4.8.4.2. Voltaje generado en el sistema piezoeléctrico, sujeto 2 de 69 Kg

Como se observa en la Fig. 41 A), se realizaron las pruebas experimentales con el sujeto 2, con un peso de 69 kg. Durante estas pruebas, se registraron y se guardaron los datos generados por el sistema piezoeléctrico.

**A)**

**B)**

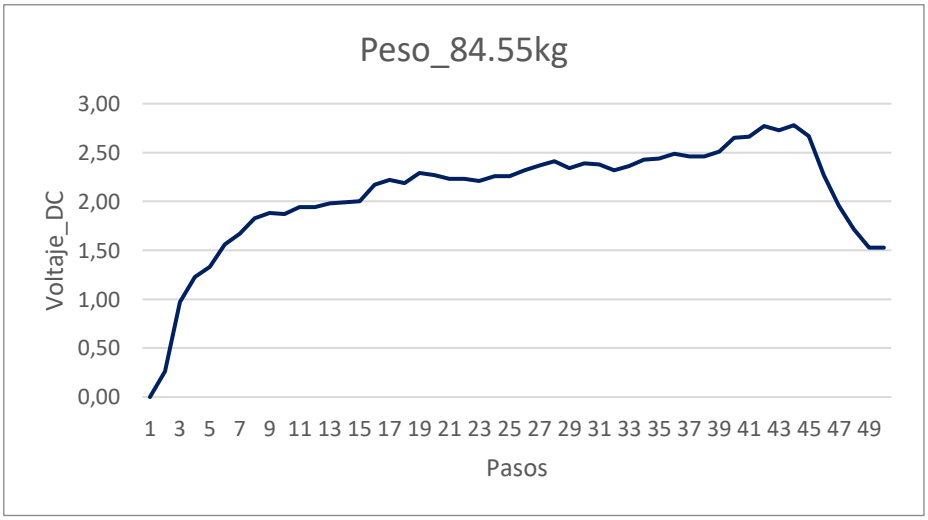
**Fig. 41. A) Pruebas de voltaje generado por el sujeto 2 peso 69kg. B) Gráfica de voltaje generado por el sujeto 2, peso 69 kg.**

Como se muestra en la Fig. 41 B), el gráfico evidencia que el voltaje DC generado por el sujeto 2, con un peso de 69 kg, al caminar sobre el sistema piezoeléctrico con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz, presentó un incremento progresivo desde 0 V hasta alcanzar aproximadamente 2,4 V.

#### 4.8.4.3. Voltaje generado en el sistema piezoeléctrico, sujeto 3 de 84.55 Kg

Como se puede observar en la Fig. 42 A), se realizaron pruebas con el sujeto 3, cuyo peso es de 84,55 kg. Este aplicó pisadas sobre el sistema piezoeléctrico con una frecuencia constante de 1,5 Hz, permitiendo registrar el comportamiento del voltaje DC generado.

**A)**




**B)**

**Fig. 42. A) Prueba de voltaje generado por el sujeto 3, peso 90kg. B) Gráfica del voltaje generado por el sujeto 3, peso 84.55kg.**

En la Fig. 42 B), se puede observar que durante las pruebas experimentales del sujeto 3 con un peso de 84,55 Kg, el sistema piezoeléctrico evidenció un incremento progresivo del voltaje DC conforme aumentaba las pisadas. Con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz, el voltaje alcanzó un máximo de 2,7V aproximadamente.

Como se observa en las Figuras 40 a 42, se realizaron las pruebas de generación utilizando 3 sujetos, todos con una frecuencia de pasos constante de 1,5 Hz. A diferencia de ensayos previos de la generación de voltaje AC, en los cuales se aseguró que el voltaje inicial fuera igual a 0 V para cada individuo, en esta serie de pruebas se corroboró a que el incremento de masa corporal está directamente relacionado con una mayor generación de voltaje.

Las gráficas correspondientes fueron elaboradas a partir de los datos obtenidos mediante el uso del entorno Arduino IDE, la placa Arduino Mega, sensor de voltaje y una tarjeta microSD. Estos registros fueron exportados a Excel para su posterior análisis. Los datos guardados se encuentran disponibles en el **Anexo 17.**

#### 4.8.4.4. Generación de voltaje por peso.

A continuación, en la Fig. 43 se presenta el grafico con las 3 curvas correspondientes a los sujetos de prueba 1, 2 y 3, cuyos pesos son de: 60,25 kg, 69 kg y 85,55 kg respectivamente. Cabe destacar que se mantiene constante la frecuencia de pasos de 1,5 Hz para todos los casos . Cada curva muestra la generación y aumento del voltaje DC obtenido por el sistema piezoeléctrico durante la marcha.

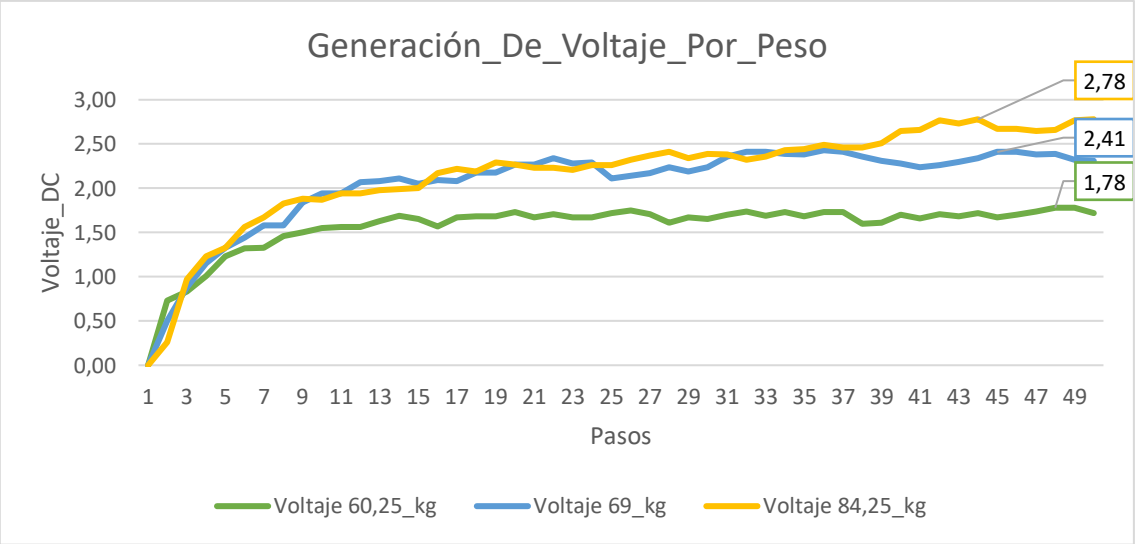



**Fig. 43. Generación de voltaje por peso.**

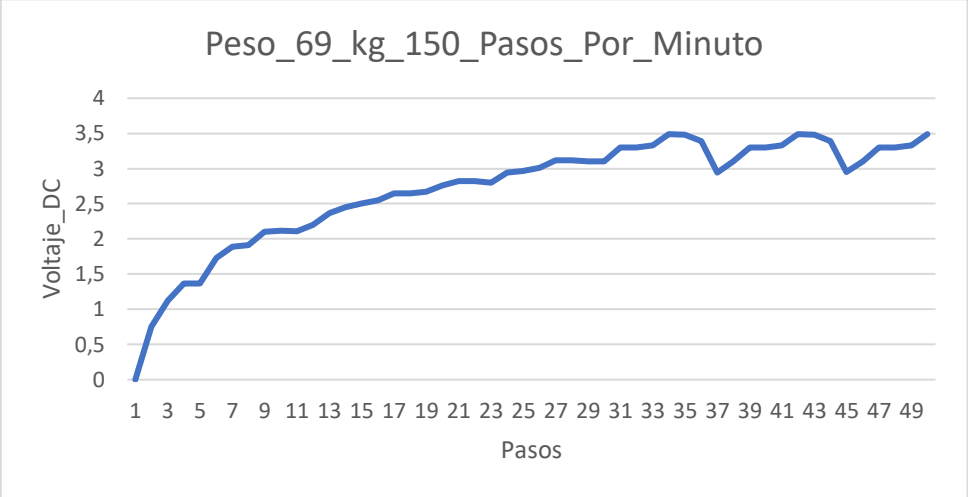
En la Fig. 43 se evidencia que, a mayor peso aplicado, es mayor el voltaje generado por el sistema piezoeléctrico. Este comportamiento confirma la estrecha relación entre la masa corporal del usuario y la eficiencia energética del sistema.

Con un peso de 60,25, el sistema muestra una eficiencia limitada ante cargas livianas, generando un voltaje promedio de 1,78 V. Para el sujeto con un peso de 69 kg, se observa una mejora considerable en respuesta del sistema, donde la generación de voltaje presenta un aumento progresivo con cada pisada, obteniendo un voltaje promedio de 2,41 V. Finalmente, con un peso de 84,55 kg se puede registra el mayor incremento sostenido en el voltaje generado, alcanzando aproximadamente 2,78 V, debido a que, el esfuerzo mecánico aplicado logra una deformación más profunda y continua del sistema piezoeléctrico.

#### 4.8.4.5. Voltaje generado con una frecuencia de pasos de 2,3 Hz por el sujeto 2 de 69 Kg

Posteriormente, como se puede observar en la Fig. 44 A), se realizaron pruebas experimentales con el sujeto 2, cuyo peso es de 69 kg, aplicando una frecuencia de pasos constante de 2.3 Hz sobre el sistema piezoeléctrico. Cabe mencionar que se seleccionó al sujeto de prueba 2 como referencia para pruebas posteriores, debido a que, según los datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT), el peso promedio masculino en Ecuador es de 69,45 kg. Esto permitió contar con un valor representativo para el análisis de generación de voltaje bajo condiciones estándar.

**A)**




**B)**

**Fig. 44. A) Prueba de voltaje generado por el sujeto 2, peso 69kg. B) Gráfica del voltaje generado por el sujeto 2, peso 69 kg.**

Como se observa en la Fig. 44 B), el voltaje generado por el individuo de 69kg alcanza un valor de 3.6 V, superando al voltaje obtenido por el sujeto de 84.55 kg, quién realizó las pruebas con una frecuencia de pasos1,5 Hz.

Este resultado se mantiene siempre que el sujeto de 69 kg realice impactos con una frecuencia constante de 2,3 Hz. Con base en este criterio, se confirma la concordancia entre los cálculos previos y los resultados experimentales obtenidos con el sistema piezoeléctrico. Los datos utilizados para graficar la curva de voltaje generado se encuentran disponibles en el **Anexo 18.**

Asimismo, el sujeto 2 fue utilizado en las pruebas posteriores de carga de la batería de almacenamiento, debido a que su peso se aproxima significativamente al peso promedio nacional.

### 4.8.4.6. Prueba de carga de batería en el prototipo

En la Fig. 45 se observa el comportamiento de carga de la batería de almacenamiento durante una prueba de 15 minutos con pisadas continuas, en la cual se aplicaron pisadas continuas sobre el sistema piezoeléctrico. Esta evaluación permitió analizar la capacidad de transferencia de energía desde el módulo hasta el sistema de almacenamiento en condiciones dinámicas de operación.

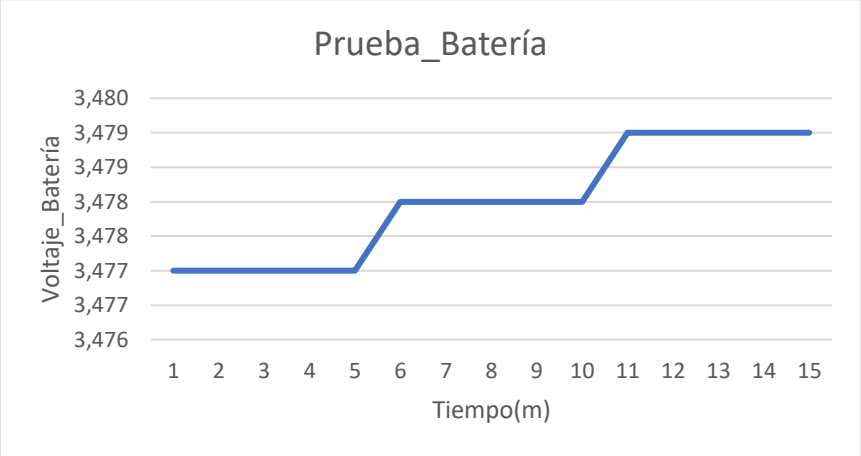



**Fig. 45. Prueba de carga de la batería de almacenamiento de Li-Ion de 3,7 V.**

La prueba se llevó a cabo con el sujeto de prueba 2 con un peso de 69 kg, debido a que este valor coincide con el peso promedio masculino en Ecuador (69.45 kg) según ENSANUT. Durante un periodo de 15 minutos de pisadas unipodales, se observó que en los primeros 5 minutos el voltaje aumentó en 1µV, y en el minuto 10 subió de igual forma 1µV. Estos resultados demuestran que el prototipo logra cargar la batería en 0.001V cada 5 minutos.

Como se puede observar en la Fig. 45, el aumento de voltaje presenta una forma escalonada, la cual refleja el proceso de acumulación intermitente de la energía mecánica transformada en energía eléctrica. Debido a que cada pisada genera un pulso de voltaje y corriente que, tras la etapa de acondicionamiento carga lentamente la batería, produciendo escalones en la curva de carga. Es decir, el voltaje del sistema se mantiene prácticamente estable hasta que la carga acumulada por las pisadas constantes supera el umbral del circuito acondicionador, generando un incremento discreto en el voltaje de la batería. Esto genera tramos de tiempo planos seguidos de pequeños saltos de voltaje, formando el efecto escalonado observado.

### 4.8.5. Análisis de resultados

Los resultados experimentales obtenidos en las pruebas del prototipo revelan tendencias respecto a la generación de energía piezoeléctrica en función de las variaciones en el peso y el número de pasos de los sujetos. Se observó que, como se esperaba el voltaje generado aumenta proporcionalmente con el peso de la persona que ejecuta los pasos.

Este comportamiento se debe a la mayor fuerza ejercida por individuos de mayor peso, lo que induce una mayor deformación en los materiales piezoeléctricos, resultando en una mayor generación de energía.

A partir de las pruebas realizadas con tres sujetos de diferentes pesos (60.25 kg, 69 kg y 84.55 kg), se evidenció que el voltaje AC máximo generado varía de 13.69 V a 18.60 V, con un voltaje AC de pico a pico que oscila entre 30.19 V y 42.82 V, dependiendo del peso y la presión aplicada. Estos resultados están en concordancia con las expectativas planteadas en la sección 4.7, donde se calculó y se describió que el voltaje generado aumenta con el peso del sujeto. Además, el sujeto de 69kg al iniciar la marcha con una frecuencia de pasos de 2,3 Hz, este supera la generación del sujeto de 84.55 kg cuando este está realizando la actividad con una frecuencia de 1,5 Hz, con voltajes de 3.6V y 2,7V respectivamente.

Los resultados mostraron que la implementación del sistema de carga y almacenamiento, junto con el sistema de captura de datos, mejoró la estabilidad y consistencia de las mediciones, lo que indica una adecuada integración de los componentes del prototipo. Estos resultados proporcionan una base sólida para el diseño y las pruebas de la tecnología piezoeléctrica, especialmente en el contexto de aplicaciones móviles y dispositivos portátiles.

En consideración, el sistema tiene una generación relativamente pequeña la cual es capaz de alimentar ciertos elementos electrónicos como leds.

## CONCLUSIONES

Con la recopilación de fundamentos teóricos permitió identificar los procesos de generación de energía eléctrica mediante el efecto piezoeléctrico, distinguiéndose el efecto directo e inverso. En este estudio se empleó el efecto piezoeléctrico directo, dado que es el más adecuado para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica. Asimismo, se analizaron distintos métodos de recolección de energía, como el piezoeléctrico, electrostático y electromagnético; siendo el primero la opción más idónea para este proyecto, debido a su capacidad de transformar de manera eficiente las deformaciones mecánicas en señales eléctricas.

El diseño del sistema de carga basado en componentes piezoeléctricos demostró la viabilidad de captar, acondicionar y transferir la energía generada hacia una batería de almacenamiento. Para ello, se implementó un circuito de acondicionamiento con etapas de rectificación, filtrado y regulación, permitiendo transformar la señal alterna, producto del esfuerzo mecánico, en una salida eléctrica continua y regulada. Este diseño demostró que, con un peso de 69 kg con una frecuencia de pasos de 1,5 Hz, generó un voltaje de salida de aproximadamente 2,41 V, logrando transferir la energía a una batería de 3,7 V. El proceso mostró un incremento de 1 mV cada 5 minutos bajo pisadas unipodales continuas, destacando su potencial en aplicaciones de bajo consumo energético.

En la implementación práctica del prototipo se utilizó Arduino IDE, Arduino Mega, un módulo de tarjeta SD y un sensor de voltaje, permitiendo capturar los datos de las variaciones de voltaje al aplicar una fuerza mecánica sobre el sistema piezoeléctrico. Las pruebas experimentales, realizadas con 3 sujetos a una frecuencia de pasos de 1,5 Hz, evidenciaron una generación de voltaje en el rango de 2 V a 2,8 V aproximadamente, confirmando que, a mayor peso y fuerza aplicada, mayor es la generación de voltaje generado. Asimismo, la potencia obtenida se situó entre 44.3 mW y 127.2 mW, dependiendo de la frecuencia de pasos en Hertz y del peso del usuario. La energía generada se almacenó en una batería de 3.7 V utilizando el módulo LTC3588, logrando alimentar cargas de muy bajo consumo ($\leq$10 µA). Sin embargo, La energía acumulada resultó insuficiente para alimentar de forma continua un celular, debido a los bajos niveles de corriente eléctrica generada por el sistema piezoeléctrico.

## RECOMENDACIONES

Es necesario investigar el uso de nuevos materiales piezoeléctricos que presenten un mayor coeficiente de generación eléctrica y una menor impedancia interna, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema del sistema piezoeléctrico y optimizando la cantidad de energía recolectada a través de las pisadas. Esta investigación permitirá identificar compuestos piezoeléctricos modificados o materiales híbridos poliméricos con mejores propiedades eléctricas y mecánicas. Además, se sugiere evaluar la integración de estructuras biomecánicas adaptativas que mejoren la transferencia de la fuerza aplicada a los dispositivos piezoeléctricos, así como el análisis experimental y simulado de su comportamiento ante esfuerzos dinámicos para maximizar la captación energética en diferentes condiciones de uso. Estas investigaciones darán paso a diseñar sistemas más compactos, eficientes y viables para aplicaciones de carga energética.

## Referencias bibliográficas

[1] M. M. Euklidiadas, «tomorrow.city,» 26 Abril 2018. [En línea]. Available: https://tomorrow.city/a/piezoelectricidad-generar-energia-con-movimiento#:~:text=La%20piezoelectricidad%20es%20un%20fen%C3%B3meno,extremos%20al%20reorganizar%20sus%20cargas..

[2] A. E. F. Galeano, «riunet.upv.es,» 3 Mayo 2016. [En línea]. Available: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fern%C3%A1ndez%20-%20Estudio%20de%20sensores%20piezoel%C3%A9ctricos%20en%20aplicaciones%20de%20medici%C3%B3n%20de%20fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

[3] E. A. Fischer y G. E. Duarte, «rinfi.fi.mdp.edu.ar,» 26 Abril 2023. [En línea]. Available: http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/315/EAFischer-TFG-IEl-2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[4] T. Kleckers, «hbm.com,» 26 Abril 2016. [En línea]. Available: https://www.hbm.com/es/6810/guia-de-seleccion-de-sensores-piezoelectricos/.

[5] A. Calderon, S. Ortega y I. Moreno, «portal.amelica.org,» 03 Mayo 2019. [En línea]. Available: http://portal.amelica.org/ameli/journal/338/3382483003/3382483003.pdf.

[6] P. R. C. Reátegui y R. F. Z. Rubina, «repositorioacademico.upc.ede.pe,» 26 Abril 2017. [En línea]. Available: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/623982/Concha_RP.pdf?sequence=4.

[7] A. Calderón, S. Ortega y I. Moreno, «portal.amelica.org,» *Diseño y desarrollo de simulador de un sistema de almacenamiento de energía mediante sensores piezoeléctricos,* vol. 7, nº 5, pp. 1-14, 2021.

[8] P. D. M. Castro, «SIMULACIÓN DE UN DISPOSITIVO PIEZOELÉCTRICO,» 25 Junio 2019. [En línea]. Available: https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2592/1/Tesis%20-%20Pedro%20Mares.pdf.

[9] F. J. J. Martínez, J. d. Frutos, D. Alonso y M. Vázquez, «Piezoelectric business optimization for use in energy systems harvesting,» 30 Noviembre 2018. [En línea]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317515000862.

[10] A. M. Malmcrona, «Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía,» 23 Septiembre 2018. [En línea]. Available: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28848/TFG_Arturo_Martin_Malmcrona_2018.pdf?sequen.

[11] H. Elahi y P. Gaudenzi, «Recolección de energía,» 23 Abril 2022. [En línea]. Available: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-harvesting.

[12] J. Dufour, «Energía y sostenibilidad,» 28 Marzo 2019. [En línea]. Available: https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2011/03/28/131138#:~:text=Las%20aplicaciones%20del%20%E2%80%9Cenergy%20harvesting,forma%20completamente%20aut%C3%B3noma%20e%20indefinida..

[13] R. Ahmed, F. Mir y S. Banerjee, «Smart Materials and Structures,» 18 Julio 2017. [En línea]. Available: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aa7bfb.

[14] J. M. Ramirez, «Desarollo de dispostivos recolectores de energía,» 12 Agosto 2020. [En línea]. Available: https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4518/Tesis%20Doctoral%20-%20Jose%20M%20Ramirez.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[15] A. L. G. Pullsguari, «Diseño y simulación de un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico para aplicaciones ferroviarias,» Quito, 2022.

[16] C. Wei y X. Jing, «A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization,» *Science Direct,* vol. 74, pp. 1-18, 2017.

[17] M. Domínguez, «¿Qué es Energy Harvesting? Extracción de energía ambiente,» 23 Febrero 2022. [En línea]. Available: https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/que-es-energy-harvesting-energia-ambiental.html.

[18] Solideo, «¿QUÉ ES EL ENERGY HARVESTING?,» 30 Enero 2021. [En línea]. Available: https://www.solideo.es/que-es-el-energy-harvesting/.

[19] B. Bera, «academia.edu,» 7 Noviembre 2017. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/37600479/Recent_Advances_In_Piezoelectric_Nano_generators_In_Energy_Harvesting_Applications.

[20] KISTLER, «Efecto piezoeléctrico,» 12 Agosto 2018. [En línea]. Available: https://www.kistler.com/INT/es/efecto-piezoelectrico/C00000136.

[21] C. L. Fabian, J. P. Cuervo y D. J. Lopez, «Generadores Piezoeléctricos como alternativa de energética,» 10 Mayo 2020. [En línea]. Available: file:///C:/Users/HOME/Downloads/1845-Texto%20del%20art%C3%ADculo-5488-1-10-20200213.pdf.

[22] L. E. G. Pérez, C. H. Borja, Á. A. González y J. L. Vicente, «Generador de energía eléctrica a través de energía limpia,» 30 Diciembre 2018. [En línea]. Available: https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Electrica/vol2num7/Revista_de_Ingenier%C3%ADa_El%C3%A9ctrica_V2_N7_3.pdf.

[23] J. P. T. Muñoz, «Generadores,» 21 Agosto 2020. [En línea]. Available: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18457/1/UPS-CT008706.pdf.

[24] M. M. Euklidiadas, «Piezoelectricidad: Usando las pisadas de los ciudadanos para generar energía,» 7 Julio 2022. [En línea]. Available: https://tomorrow.city/a/piezoelectricidad-generar-energia-con-

movimiento#:~:text=La%20piezoelectricidad%20es%20un%20fen%C3%B3meno,extremos%20al%20reorganizar%20sus%20cargas..

[25] J. M. L. Sancho y E. M. Gómez, «El generador piezoeléctrico,» 15 Octubre 2019. [En línea]. Available: https://museovirtual.csic.es/csic75/laboratorios/lab1/lab1b.html.

[26] L. G. Estévez, «Estudio del comportamiento,» 28 Junio 2020. [En línea]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/329265/REPORT_Gonz%C3%A1lez_Est%C3%A9vez_Laura_fitxer%20de%20consulta.pdf?sequence=5&isAllowed=y.

[27] M. C. M. Fernando, «Modelamiento de un sistema de nanogeneradores eléctricos basados en los efecto tribo y piezoeléctrico,» 26 Mayo 2021. [En línea]. Available: http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11214/2/04%20MEL%20108%20TRABAJO%20GRADO.pdf.

[28] P. M. Martínez, «TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS,» 6 Julio 2021. [En línea]. Available: http://dspace.umh.es/bitstream/11000/8523/1/TFG-Monllor%20Mart%C3%ADnez%2C%20Pedro.pdf.

[29] Electronicsforu.com, «What Is A Piezoelectric Sensor?,» 5 Agosto 2019. [En línea]. Available: https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/piezoelectric-sensor-basics.

[30] P. Kalbermatten, «Principios, selección y diseño con actuadores piezoeléctricos,» 28 Noviembre 2022. [En línea]. Available: https://www.interempresas.net/Electronica/Articulos/445453-Principios-seleccion-y-diseno-con-actuadores-piezoelectricos.html.

[31] S. I. C. Andrango, 26 Junio 2021. [En línea]. Available: file:///C:/Users/HOME/OneDrive%20-

%20Universidad%20Tecnica%20del%20Norte/2023/Tesis_I/Recursos/Recursos_Tema_Tesis/04%20MEL%20178%20TRABAJO%20GRADO.pdf.

[32] Alex, «Transductor piezoeléctrico,» 27 Junio 2021. [En línea]. Available: https://transductor.net/acerca-del-transductor-piezoelectrico/.

[33] D. S. Arar, «Comprender los conceptos básicos del acelerómetro piezoeléctrico,» 20 Marzo 2022. [En línea]. Available: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-piezoelectric-accelerometers-piezoelectric-sensor-basics/.

[34] AZO sensors, «Aplicaciones y el principio de funcionamiento de los acelerómetros piezoeléctricos,» 10 junio 2020. [En línea]. Available: https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=309.

[35] W. J. G. Cobacango, «Análisis de la generacion piezoeléctrica mediante el estudio de las fluctuaciones de presión hidráulica,» Ibarra, 2022.

[36] M. E. C. Sarmiento y J. L. J. Herrera, «Implementación de un sistema de generación de energía limpia por medio de sensores piezoeléctricos para la iluminación de la entrada de bloque B de la UTC extensión Maná,» La Maná, 2022.

[37] C. Santacruz, «Análisis técnico de los diferentes tipos de baterías comercialmente disponibles para su integración en el proyecto de una microred,» 2015.

[38] I. R. M. Jiménez y D. A. L. López, «Gobierno de México,» 23 Mayo 2018. [En línea]. Available: https://www.repo-ciie.dfie.ipn.mx/browser-institucion.php.

[39] F. V. N. Aliaga, «Estudio de la viabilidad técnica de un sistema de captación de energía piezoeléctrica con aplicacion en plantillas de calzado deportivo,» Lima - Perú, 2021.

[40] M. C. Rodríguez y F. J. E. Garza, «Actuadores piezoeléctricos,» *Ingenierías,* vol. III, nº 6, p. 28, Marzo 2000.

[41] M. A. Zamora, «Av Electronics,» [En línea]. Available: https://avelectronics.cc/producto/puente-rectificador-2w10/. [Último acceso: 23 Abril 2024].

[42] ECOMAKERS MEXICO, «REUSA Electrónicos,» 10 Mayo 2022. [En línea]. Available: https://reusaelectronicos.com/blogs/ecomakerstore/que-es-un-capacitor-y-que-es-un-condensador-electrico. [Último acceso: 23 Abril 2024].

[43] F. G. Alvarado, «Baterías recargable de litio: Fundamentos y materiales,» vol. II, nº 4, p. 10, 2018.

[44] L. R. Peña, «UCA Universidad de Cádiz,» [En línea]. Available: https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/14764/practica%202%20diod%20prot.pdf. [Último acceso: 23 Abril 2024].

[45] J. P. Varga pilicita, «ANÁLISIS COMPARATIVO DEL NIVEL DE ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDA POR BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS EN FUNCIÓN DE SU FORMA GEOMÉTRICA EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI,» Universidad Técnica de Cotopaxi , Latacunga, 2020.

[46] «Software Shop,» 19 Julio 2013. [En línea]. Available: https://www.software-shop.com/formacion/formacion-info/1764. [Último acceso: 12 Noviembre 2023].

[47] «Proteus,» 2023. [En línea]. Available: https://www.labcenter.com/. [Último acceso: 12 Diciembre 2023].

[48] The MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/products/matlab.html. [Último acceso: 23 Agosto 2024].

[49] «Autodesk,» [En línea]. Available: https://www.autodesk.com/mx/products/fusion-360/overview?cjdata=MXxOfDB8WXww&mktvar002=afc_latam_deeplink&

AID=13955714&PID=8299320&SID=jkp_Cj0KCQjwna6_BhCbARIsALId2Z3n5yC4_2_ObDPpatK5oRhmvqq6a_9Tz9n5KrAjouhRErNhvfWgemIaAuJWEALw_wcB&cjevent=56433d060f0711f. [Último acceso: 23 Agosto 2024].

[50] «Arduino,» [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/. [Último acceso: 13 septiembre 2024].

[51] L. B. Peralta, «Estudio de materiales piezoeléctricos con espectroscopia de resonancia ultrasónica,» *Repositorio Uniandes,* nº 51, pp. 6-7, Junio 2023.

[52] J. Matthey, «HOERBIGER,» 2017. [En línea]. Available: https://www.piezoproducts.com/products-solutions/ultrasonic-atomizers/. [Último acceso: 4 Abril 2024].

[53] D. Valencia y G. Rueda, Artists, *ANALISIS DE VIABILIDAD PARA DESARROLLO DE PROTOTIPO DE ACERA QUE PRODUCE ELECTRICIDAD.* [Art]. 2012.

[54] T. A. Blanco, «BBVA,» Sostenibilidad y Banca Responsable, [En línea]. Available: https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-y-como-calcular-la-potencia-electrica/. [Último acceso: 10 Abril 2024].

[55] E. C. Leskow, «concepto.de,» Editorial Etecé, 15 Julio 2021. [En línea]. Available: https://concepto.de/peso-especifico/. [Último acceso: 17 Abril 2024].

## Anexos

**Anexo 1**. Datasheet del piezoeléctrico flexible

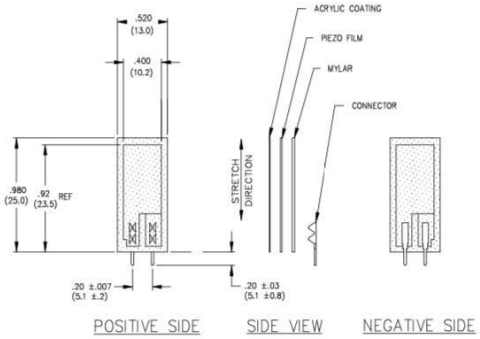
measurement SPECIALTIES

# LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

Piezo Film Sensors
High Sensativity
AC Coupled
Laminated
Robust

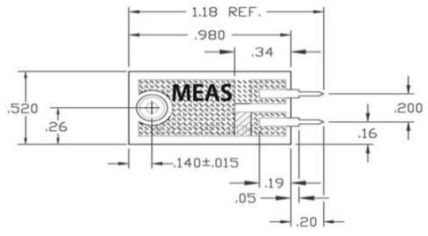
**The LDT0-028K** is a flexible component comprising a 28 µm thick piezoelectric PVDF polymer film with screen-printed Ag-ink electrodes, laminated to a 0.125 mm polyester substrate, and fitted with two crimped contacts. As the piezo film is displaced from the mechanical neutral axis, bending creates very high strain within the piezopolymer and therefore high voltages are generated. When the assembly is deflected by direct contact, the device acts as a flexible "switch", and the generated output is sufficient to trigger MOSFET or CMOS stages directly. If the assembly is supported by its contacts and left to vibrate "in free space" (with the inertia of the clamped/free beam creating bending stress), the device will behave as an accelerometer or vibration sensor. Adding mass, or altering the free length of the element by clamping, can change the resonant frequency and sensitivity of the sensor to suit specific applications. Multi-axis response can be achieved by positioning the mass off center. The LDTM-028K is a vibration sensor where the sensing element comprises a cantilever beam loaded by an additional mass to offer high sensitivity at low frequencies.

## dimensions



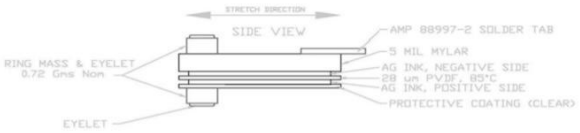

## FEATURES

- Solder Tab Connection
- Both No Mass & With Mass Version
- Withstands High Impact
- Operating Temperature: 0ºC to 85ºC
- Storage Temperature: -40ºC to 85 ºC
- Higher Temperature Version up to 125 ºC available on a Custom Basis




## APPLICATIONS

- Vibration Sensing in Washing Machine
- Low Power Wakeup Switch
- Low Cost Vibration Sensing
- Car Alarms
- Body Movement
- Security Systems



# LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

measurement SPECIALTIES

## examples of properties

Four different experiments serve to illustrate the various properties of this simple but versatile component.

**Experiment #1**

**LDT0 as Vibration Sensor** - with the crimped contacts pushed through a printed-circuit board, the LDT0 was soldered carefully in place to anchor the sensor. A charge amplifier was used to detect the output signal as vibration from a shaker table was applied (using a charge amplifier allows a very long measurement time constant and thus allows the "open-circuit" voltage response to be calculated). Small masses (approximately 0.26g increments) were then added to the tip of the sensor, and the measurement repeated. Results are shown in Table 1 and the overlaid plots in Fig. 1. Without adding mass, the LDT0 shows a resonance around 180 Hz. Adding mass to the tip reduces the resonance frequency and increases "baseline" sensitivity.

LDT0 Sensitivity: Effect of Added Mass
(Figure 1)

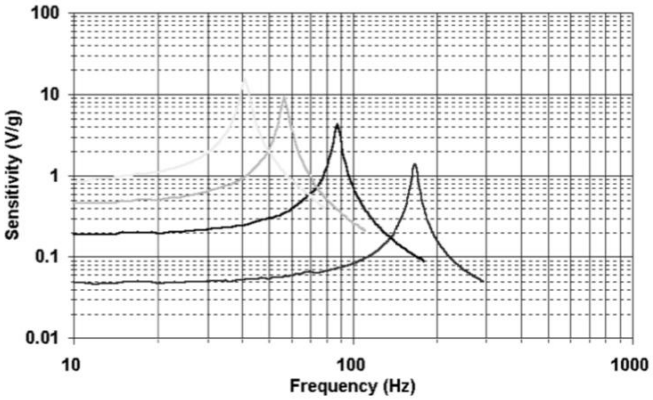


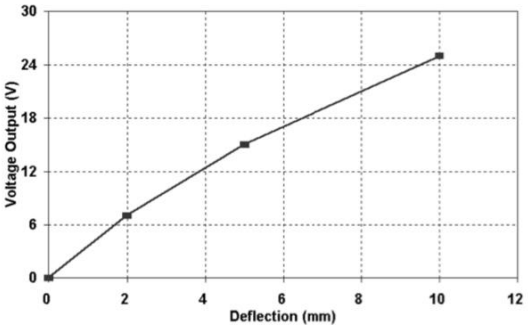

TABLE 1: LDT0 as Vibration Sensor (see Fig 1)

| Added Mass | Baseline Sensitivity | Sensitivity at Resonance | Resonant Frequency | +3 Db Frequency |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 50 mV/g | 1.4 V/g | 180 Hz | 90 Hz |
| 1 | 200 mV/g | 4 V/g | 90 Hz | 45 Hz |
| 2 | 400 mV/g | 8 V/g | 60 Hz | 30 Hz |
| 3 | 800 mV/g | 16 V/g | 40 Hz | 20 Hz |

**Experiment #2**

**LDT0 as Flexible Switch** - using a charge amplifier to obtain "open-circuit" voltage sensitivity, the output was measured for controlled tip deflections applied to the sensor (supported by its crimped contacts as described above). 2 mm deflection was sufficient to generate about 7 V. Voltages above 70V could be generated by bending the tip of the sensor through 90° (see Table 2, Fig. 2).

LDT0: Voltage Output vs Tip deflection
(Figure 2)



# LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

measurement SPECIALTIES

## examples of Properties (continued)

**TABLE 2: LDT0 as Flexible Switch (see Fig 2)**

| Tip Deflection | Charge Output | o/c Voltage Output |
|---|---|---|
| 2 mm | 3.4 nC | 7 V |
| 5 mm | 7.2 nC | 15 V |
| 10 mm | 10 - 12 nC | 20 - 25 V |
| max (90E) | > 30 nC | > 70 V |

**Experiment #3**
**LDT0 Electrical Frequency Response** - when the source capacitance of around 480 pF is connected to a resistive input load, a high-pass filter characteristic results. Using an electronic noise source to generate broad-band signals, the effect of various load resistances was measured and the -3 dB point of the R-C filter determined (see Table 3, Fig. 3).

**LDT0 Electrical Frequency Response**
**(Figure 3) C: 480 pF**

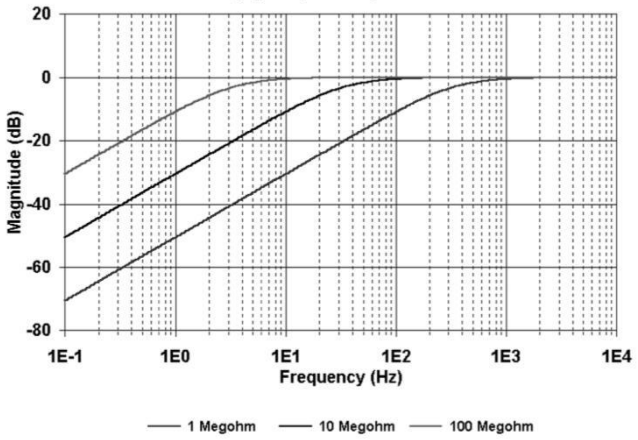



**TABLE 3: LDT0 Electrical Frequency Response**
**(see Fig 3)**
**(480 pF source capacitance)**

| Load Resistance | -3 db Frequency |
|---|---|
| 1 Megohm | 330 Hz |
| 10 Megohm | 33 Hz |
| 100 Megohm | 3.3 Hz |

# LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

measurement SPECIALTIES

**Experiment #4**
**LDT0 Clamped at Different Lengths** - using simple clamping fixture, the vibration sensitivity was measured (as in (1) above) as the clamp was moved to allow different "free" lengths to vibrate. The sensor may be "tuned" to suit specific frequency response requirements (see Table 4, Fig. 4).

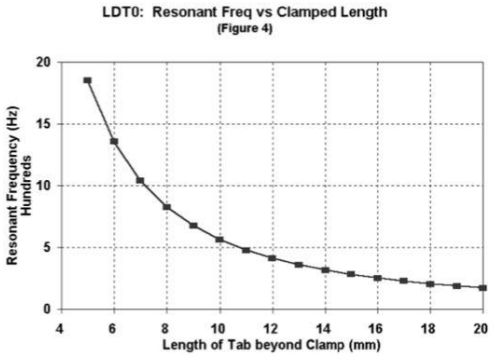



**TABLE 4: LDT0 Clamped at Different Lengths (See Fig. 4)**

| Length Beyond Clamp | Resonant Frequency | Settling Time (5 cyc) |
|---|---|---|
| 20 mm (no clamp) | 180 Hz | 28 msec |
| 16 mm | 250 Hz | 20 msec |
| 11 mm | 500 Hz | 10 msec |
| 7 mm | 1000 Hz | 5 msec |

The information in this sheet has been carefully reviewed and is believed to be accurate; however, no responsibility is assumed for inaccuracies. Furthermore, this information does not convey to the purchaser of such devices any license under the patent rights to the manufacturer. Measurement Specialties, Inc. reserves the right to make changes without further notice to any product herein. Measurement Specialties, Inc. makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its product for any particular purpose, nor does Measurement Specialties, Inc. assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. Typical parameters can and do vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Measurement Specialties, Inc. does not convey any license under its patent rights nor the rights of others.

## ordering information

| Description | Part Number |
|---|---|
| LDT0-028K | 1002794-0 |
| LDTM-028K | 1005447-1 |

North America

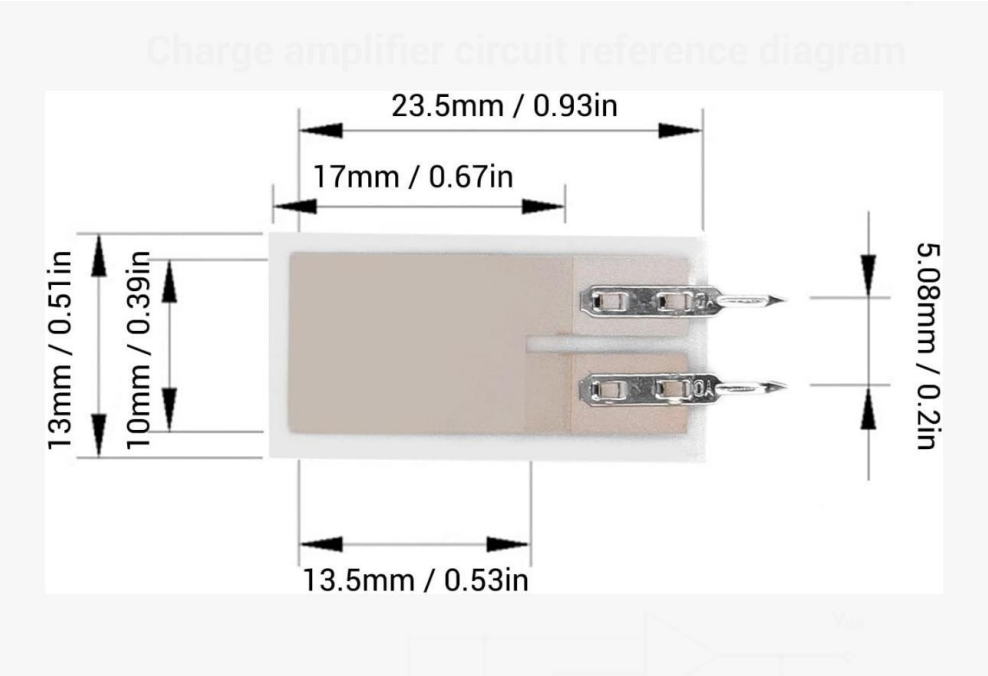
Measurement Specialties, Inc.
1000 Lucas Way
Hampton, VA 23666
Sales and Customer Service
Tel: +1-800-745-8008 or
+1-757-766-1500
Fax: +1-757-766-4297
Technical Support
Email: piezo@meas-spec.com

Europe

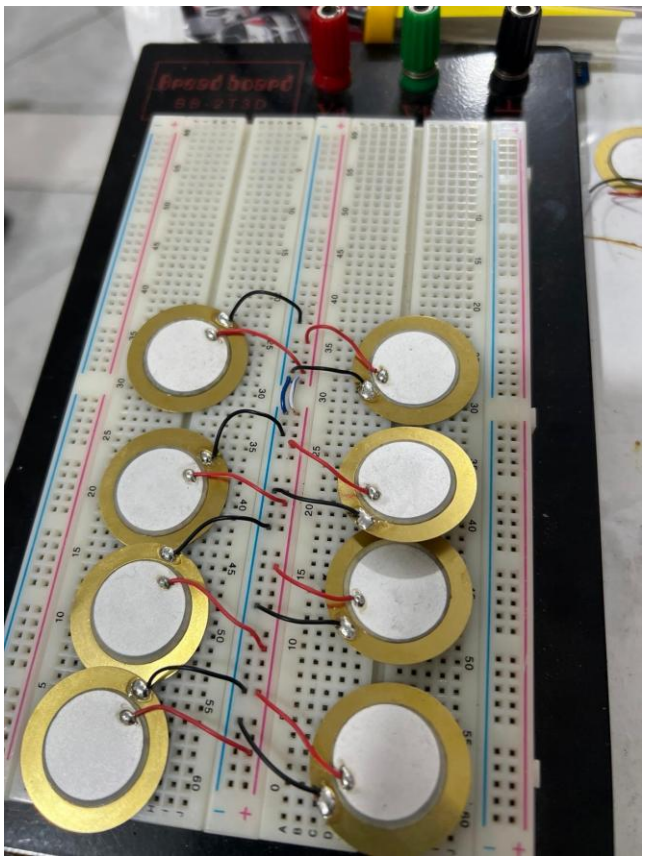
MEAS Deutschland GmbH
Hauert 13
44227 Dortmund
Germany
Sales and Customer Service
Tel: +49 (0)231 9740 21
Technical Support
Tel: +49 (0)6074 862822
Email: piezoeurope@meas-spec.com

Asia

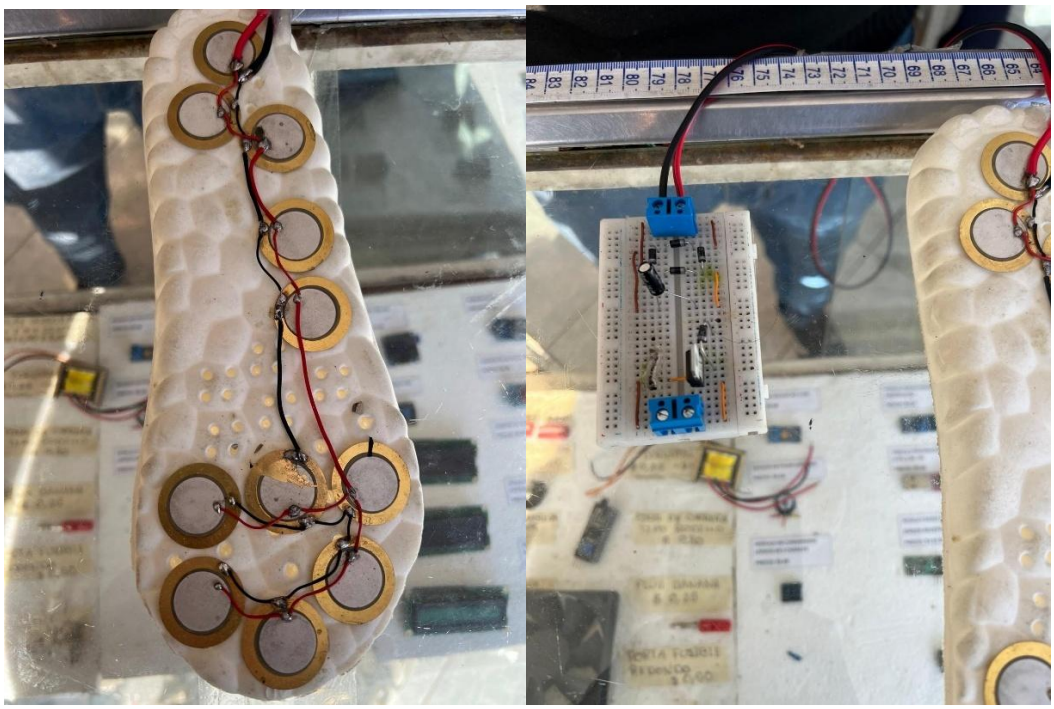
Measurement Specialties (China), Ltd.
No. 26 Langshan Road
Shenzhen High-Tech Park (North)
Nanshan District
Shenzhen, China 518107
Sales and Customer Service
Tel: +86 755 3330 5088
Technical Support
Email: piezo@meas-spec.com




**Anexo 2.** Pruebas de discos piezoeléctricos en protoboard

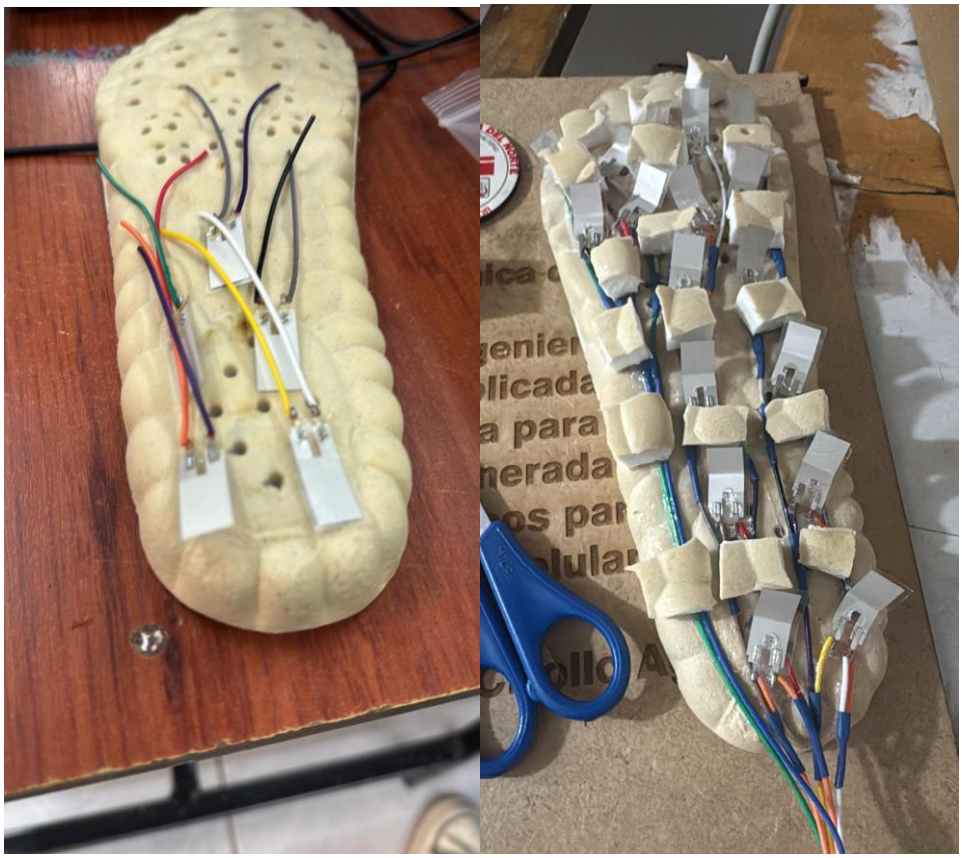


**Anexo 3.** Prototipo con discos piezoeléctricos en plantilla ergonómica

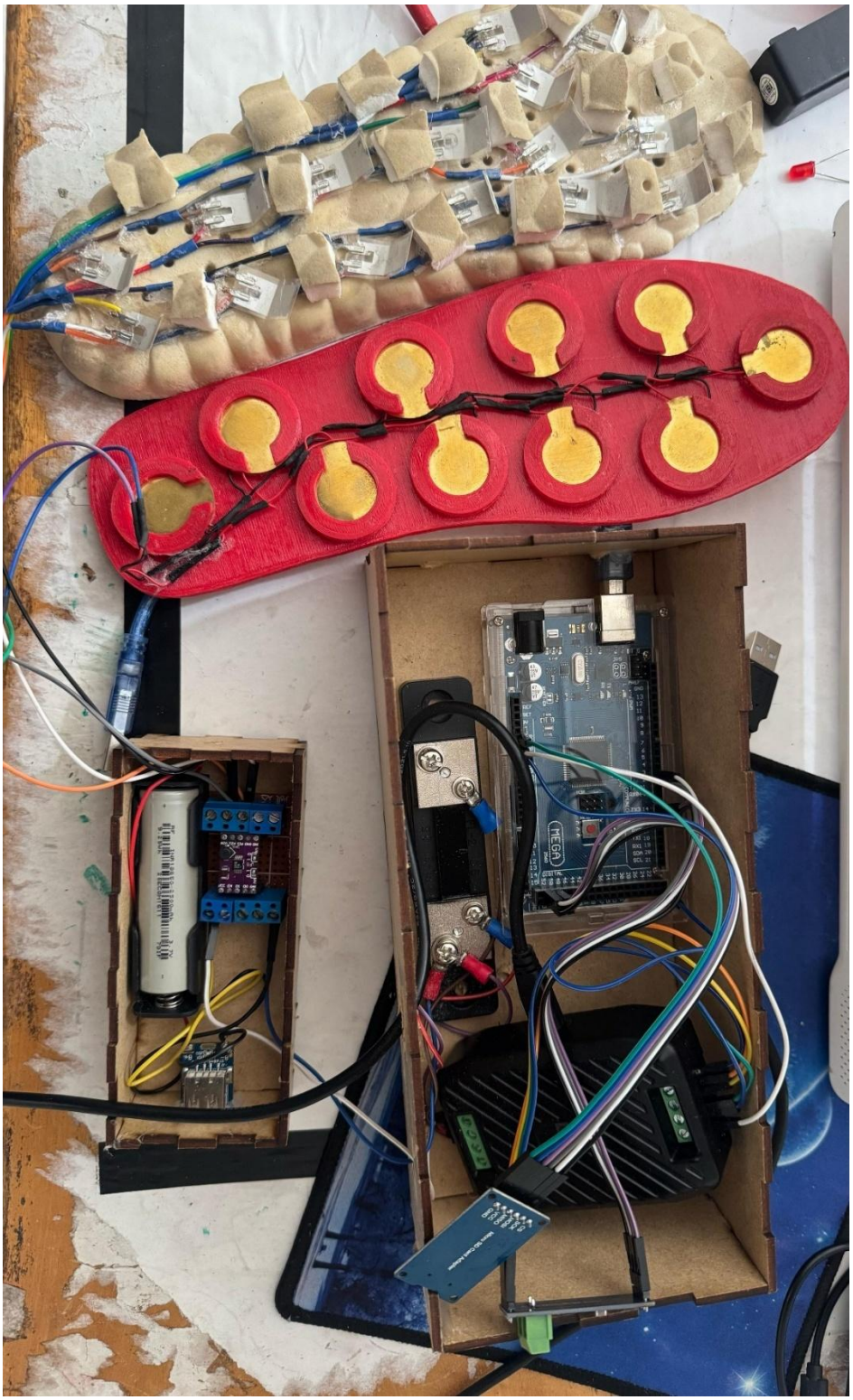


**Anexo 4.** Prototipo en plantilla común

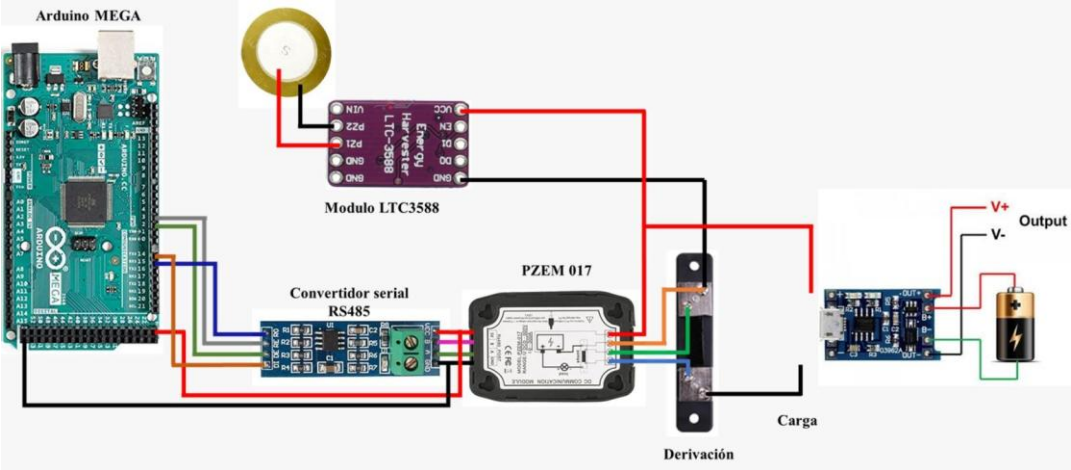
**Anexo 5.** Prototipo con piezoeléctricos flexibles en plantilla ergonómica



**Anexo 6.** Prototipo final

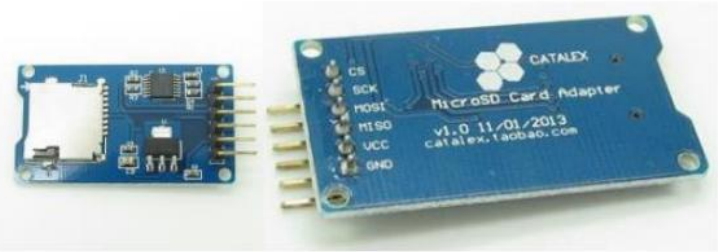


**Anexo 7.** Diagrama de conexión del prototipo




**Anexo 8.** Datasheet del módulo Micro SD

## Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino

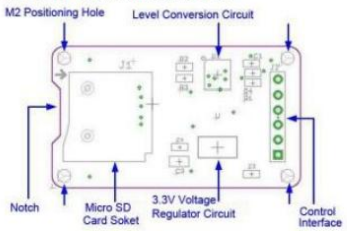



### Description

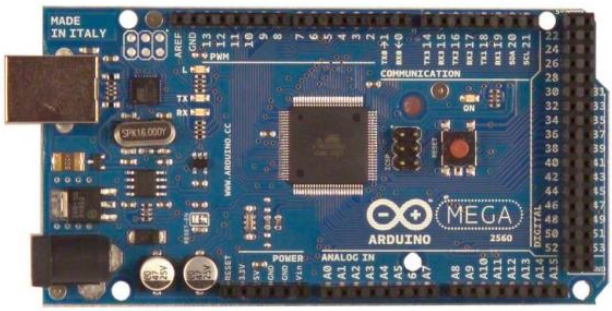
- The module (MicroSD Card Adapter) is a Micro SD card reader module for reading and writing through the file system and the SPI interface driver, SCM system can be completed within a file MicroSD card
- Support Micro SD Card, Micro SDHC card (high speed card)
- Level conversion circuit board that can interface level is 5V or 3.3V
- Power supply is 4.5V ~ 5.5V, 3.3V voltage regulator circuit board
- Communications interface is a standard SPI interface
- 4 M2 screws positioning holes for easy installation
- Control Interface: A total of six pins (GND, VCC, MISO, MOSI, SCK, CS), GND to ground, VCC is the power supply, MISO, MOSI, SCK for SPI bus, CS is the chip select signal pin;
- 3.3V regulator circuit: LDO regulator output 3.3V for level conversion chip, Micro SD card supply;
- Level conversion circuit: Micro SD card to signal the direction of converts 3.3V, MicroSD card interface to control the direction of the MISO signal is also converted to 3.3V, general AVR microcontroller systems can read the signal;
- Micro SD card connector: self bomb deck, easy card insertion.
- Positioning holes: 4 M2 screws positioning holes with a diameter of 2.2mm, so the module is easy to install positioning, to achieve inter-module combination.

| Items | Min | Typical | Max | Unit |
|---|---|---|---|---|
| Power Voltage VCC | 4.5 | 5 | 5.5 | V |
| Current | 0.2 | 80 | 200 | mA |
| Interface Electrical Potential | 3.3 or 5 | | | V |
| Support Card Type | Micro SD Card(<=2G), Mirco SDHC Card(<=32G) | | | — |
| Size | 42X24X12 | | | mm |
| Weight | 5 | | | g |

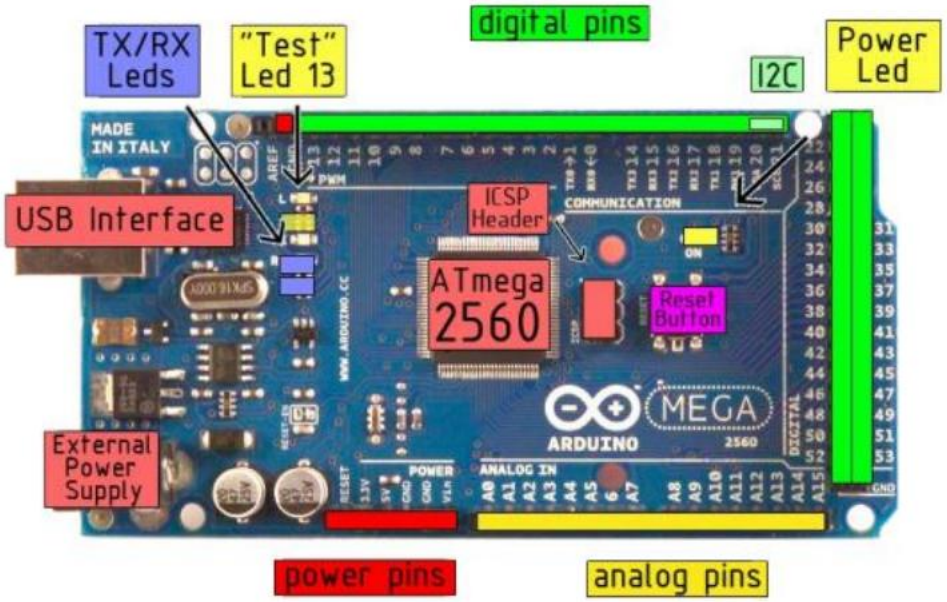
**Mirco SD Card Interface Module:**




**Anexo 9.** Datasheet Arduino Mega 2560




| Summary | |
|---|---|
| Microcontroller | ATmega2560 |
| Operating Voltage | 5V |
| Input Voltage (recommended) | 7-12V |
| Input Voltage (limits) | 6-20V |
| Digital I/O Pins | 54 (of which 14 provide PWM output) |
| Analog Input Pins | 16 |
| DC Current per I/O Pin | 40 mA |
| DC Current for 3.3V Pin | 50 mA |
| Flash Memory | 256 KB of which 8 KB used by bootloader |
| SRAM | 8 KB |
| EEPROM | 4 KB |
| Clock Speed | 16 MHz |
| the board | |




**Anexo 10.** Código IDE Arduino para adquirir datos

```
//LIBRERIAS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA SSD
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <ModbusMaster.h>   //librería para la comunicación MODBUS del PZEM
#include "ACS712.h"         //Liberia para el funcionamiento del sensor de corriente DC
#include <SoftwareSerial.h>

//DECLARACION DE PINES Y VARIABLES PARA FUNCIONAMIENTO DE COMUNICACION MODBUS
#define MAX485_DE      2                // Defino pin DE para Arduino. Conecte el pin DE del módulo convertidor Max485 al pin 2 (predeterminado) de la placa Arduino
#define MAX485_RE      3                // Defino pin RE para Arduino. Conecte el pin RE del módulo convertidor Max485 al pin 3 (predeterminado) de la placa Arduino

static uint8_t pzemSlaveAddr = 0x01;       // Declaro la dirección del dispositivo (medidor) en términos de 8 bits. Puede cambiar a 0x02, etc. solo si tiene más de 1 sensor.
static uint16_t NewshuntAddr = 0x0001;     // Declaro el valor de derivación externa. El valor predeterminado es 100A, reemplace a "0x0001" si usa una derivación de 50A, 0x0002 es para 200A, 0x0003 es para 300A
ModbusMaster node;

//DECLARACION DE VARIABLES DE MAGNITUDES QUE SE PUEDEN OBTENER MEDIANTE PZEM
float corriente_dc = 0;         // Variable para guardar el valor de corriente DC
```

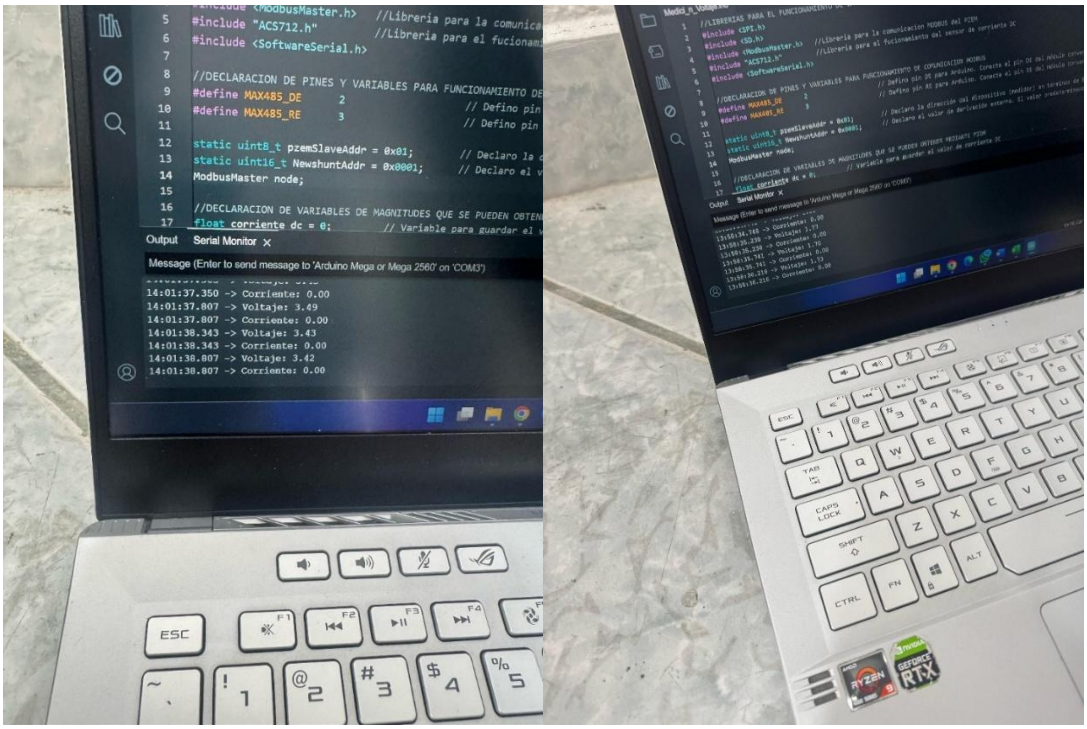
```
float PZCorriente = 0;
float PZVoltaje = 14.2;
float PZPotencia = 0;
float PZEnergia = 0;

//DECLARACION DE VARIABLES DE MAGNITUDES QUE SE PUEDEN OBTENER MEDIANTE PZEM EN TIPO STRING
String S_Voltaje = " ";          //Variable para guardar el valor de temperatura en formato string para envío a tarjeta ssd
String S_Corriente = " ";            //Variable para guardar el valor de PH en formato string para envío a tarjeta ssd
String S_mediciones = " ";
String escritura = " ";              //Variable para enviar los datos al archivo

//DECLARACION DE PINES Y VARIABLES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MODULO SD
const byte pinSD = 53;               //Pin de comunicación con el módulo de tarjeta ssd
File myFile;                        //Establezco el uso de archivo para ser guardado
String nombreArchivo = "/Datos.csv";   //Ingresar el nombre del archivo a guardar

//VARIABLES TIPO MILLIS PARA EL CONTROL DE TIEMPOS EN EL CODIGO
unsigned long previoMillis = 0;  //Declaro variable en millis para condicional de impresión
unsigned long actualMillis = 0;
const unsigned long intervalos = 500; // Tiempo de medición en ms
int mediciones = 0;

void setup() {

  Serial.begin(115200,SERIAL_8N2);     //Inicio comunicación serial con la PC
  Serial3.begin(9600,SERIAL_8N1);      //Inicializa el puerto serial para el sensor MODBUS

  //DECLARACION DE FUNCION DE PINES Y INICIALIZACION DE PROCESOS PARA COMUNICACION MODBUS
  node.begin(pzemSlaveAddr, Serial3);

  pinMode(MAX485_RE, OUTPUT);              // Defina RE Pin como salida de señal para el convertidor RS485. El pin de salida significa que Arduino ordena que la señal del pin suba o baje para que el convertidor reciba la señal
  pinMode(MAX485_DE, OUTPUT);              // Defina DE Pin como salida de señal para el convertidor RS485. El pin de salida significa que Arduino ordena que la señal del pin suba o baje para que el convertidor reciba la señal
```

```
  node.preTransmission(preTransmission);      // Las devoluciones de llamada nos permiten
configurar correctamente el transceptor RS485
  node.postTransmission(postTransmission);
  changeAddress(0XF8, 0x01);
  ////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
   //INICIALIZO FUNCIONAMIENTO DE LA TARJETA SD
  if (!SD.begin(pinSD)) {
    Serial.println("No se inició la SD");
    while (1);
  }
  Serial.println("Se inició la SD exitosamente");

  //Escribo el encabezado de las variables a guardar en el documento EXCEL
  if(!SD.exists(nombreArchivo)) {
    myFile = SD.open(nombreArchivo, FILE_WRITE);
    for (int i = 0; i < 3; i++) {
      if (myFile) {
        Serial.println("Archivo nuevo, Escribiendo encabezado");
        myFile.println("Mediciones;Voltaje(V);Corriente(A)");
        myFile.close();
        break;
      } else {
        Serial.println(("Error creando el archivo " + nombreArchivo));
        delay(500);
      }
    }
  }

}

void loop() {
  actualMillis = millis();

  if(actualMillis - previoMillis >= intervalos){

    Lec_PZEM();

    previoMillis = actualMillis;
    mediciones++;
    S_mediciones= String(mediciones);

     escritura = S_mediciones + ";" + S_Voltaje + ";" + S_Corriente;
```

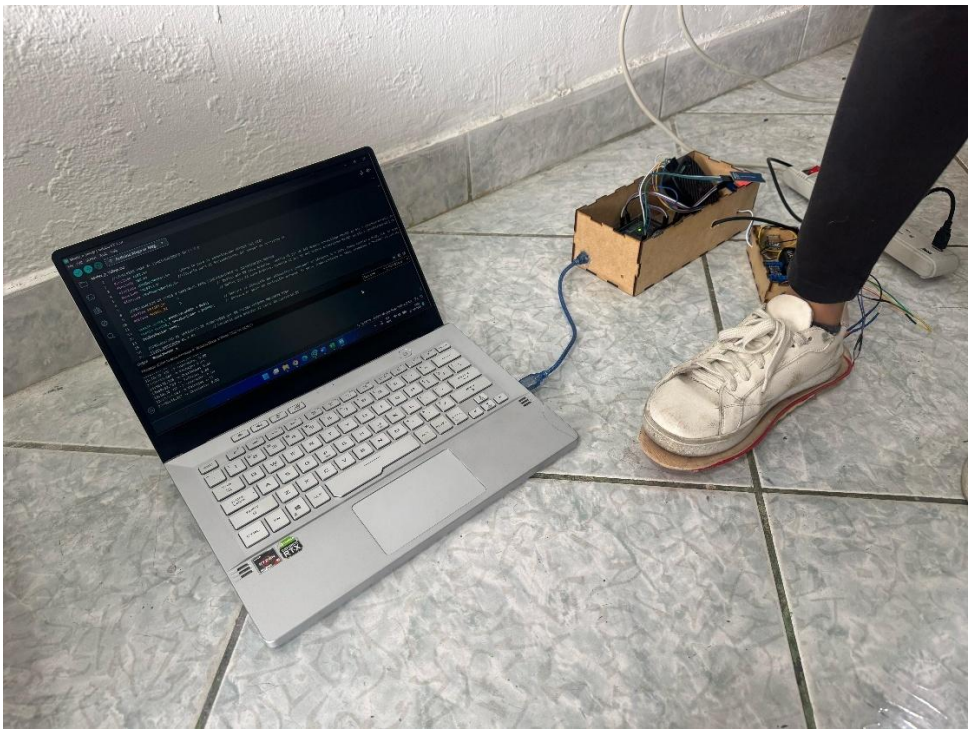
```
  myFile = SD.open(nombreArchivo, FILE_WRITE);
  if (myFile) {
   myFile.println(escritura);
   myFile.close();
   }else{
    Serial.println(("Error al abrir el archivo " + nombreArchivo));
    }

 }


}

// FUNCION PARA LA OBTENCION DE CORRIENTE DC

void Lec_PZEM(){

 uint8_t result;
 result = node.readInputRegisters(0x0000, 2);

 if (result == node.ku8MBSuccess){

  uint32_t tempdouble = 0x00000000;
  PZVoltaje = node.getResponseBuffer(0x0000) / 100.0;

  PZCorriente = node.getResponseBuffer(0x0001) / 200.0;

  S_Corriente = String(PZCorriente);
  S_Voltaje = String(PZVoltaje);

  Serial.print("Voltaje: ");
  Serial.println(PZVoltaje);
  Serial.print("Corriente: ");
  Serial.println(PZCorriente);

  if (pzemSlaveAddr==2){
   Serial.println();
   }
  }else{
   Serial.println("Fallo comunicación MODBUS");
   }
}
```

```
void changeAddress(uint8_t OldslaveAddr, uint8_t NewslaveAddr){

    static uint8_t SlaveParameter = 0x06;
    static uint16_t registerAddress = 0x0002;
    uint16_t u16CRC = 0xFFFF;
    u16CRC = crc16_update(u16CRC, OldslaveAddr);
    u16CRC = crc16_update(u16CRC, SlaveParameter);
    u16CRC = crc16_update(u16CRC, highByte(registerAddress));
    u16CRC = crc16_update(u16CRC, lowByte(registerAddress));
    u16CRC = crc16_update(u16CRC, highByte(NewslaveAddr));
    u16CRC = crc16_update(u16CRC, lowByte(NewslaveAddr));

    //Serial.println("Change Slave Address");
    preTransmission();

    Serial3.write(OldslaveAddr);
    Serial3.write(SlaveParameter);
    Serial3.write(highByte(registerAddress));
    Serial3.write(lowByte(registerAddress));
    Serial3.write(highByte(NewslaveAddr));
    Serial3.write(lowByte(NewslaveAddr));
    Serial3.write(lowByte(u16CRC));
    Serial3.write(highByte(u16CRC));
    delay(5);
    postTransmission();
    delay(5);
}

void preTransmission(){

    digitalWrite(MAX485_RE, 1);
    digitalWrite(MAX485_DE, 1);
    delay(1);
}

void postTransmission(){

    delay(3);
    digitalWrite(MAX485_RE, 0);
    digitalWrite(MAX485_DE, 0);
}
```

**Anexo 11.** Monitor Serial de IDE Arduino




**Anexo 12.** Pruebas de funcionamiento del prototipo



**Anexo 13.** Código Matlab para cálculo de tensión eléctrica generada por pasos

```
% Parámetros iniciales
g33 = 27e-3; % Constante piezoeléctrica (Vm/N)
h = 1e-3; % Longitud o espesor del material piezoeléctrico (m)
d_ceramic = 35e-3; % Diámetro del cerámico piezoeléctrico (m)
A = pi * (d_ceramic / 2)^2; % Área efectiva del material (m^2)

% Peso base y variación aleatoria
peso_base = 70; % Peso base en kg
num_pasos = 100; % Número de pasos
variaciones = randi([5, 10], 1, num_pasos); % Variación aleatoria de
pesos_variados = peso_base + variaciones; % Peso total para cada pasc

% Aceleración gravitacional
g = 9.81; % m/s^2

% Fuerzas aplicadas basadas en los pesos aleatorios
fuerzas = pesos_variados .* g; % Fuerza en Newtons para cada paso

% Cálculo del voltaje generado por paso
voltajes = zeros(1, num_pasos); % Inicialización del voltaje
for j = 1:num_pasos
    voltajes(j) = g33 * h * (fuerzas(j) / A); % Voltaje generado para
end


% Mostrar resultados
disp('Voltajes generados por paso (V):');
disp(voltajes);

% Gráfica de resultados
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(1:num_pasos, pesos_variados, '-o', 'DisplayName', 'Peso por paso'
xlabel('Número de pasos');
ylabel('Peso (kg)');
title('Variación de peso por paso');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(1:num_pasos, voltajes, '-o', 'DisplayName', 'Voltaje generado por
xlabel('Número de pasos');
ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje generado por pasos con variación de peso');
grid on;
```

**Anexo 14.** Código Matlab para cálculo voltaje generado por pesos

```
% Parámetros iniciales
g33 = 28e-3; % Constante piezoeléctrica (Vm/N)
h = 1e-3; % Longitud o espesor del material piezoeléctrico (m)
d_ceramic = 27e-3; % Diámetro del cerámico piezoeléctrico (m)
A = pi * (d_ceramic / 2)^2; % Área efectiva del material (m^2)

% Configuración de pesos de las personas (kg)
pesos = [50, 70, 90]; % Pesos en kg

% Aceleración gravitacional
g = 9.81; % m/s^2

% Número de pasos
num_pasos = 100; % Número de pasos asumidos

% Fuerzas aplicadas basadas en el peso
fuerzas = pesos .* g; % Fuerza en Newtons

  % Cálculo del voltaje generado
  voltajes = zeros(length(fuerzas), num_pasos); % Inicialización del vol
for i = 1:length(fuerzas)
    for j = 1:num_pasos
        % Voltaje generado por paso
        voltajes(i, j) = g33 * h * (fuerzas(i) / A);
    end
end

  % Mostrar resultados
  disp('Voltajes generados por paso (V):');
for i = 1:length(fuerzas)
    fprintf('Peso: %d kg\n', pesos(i));
    fprintf('Voltaje promedio por paso: %.4f V\n', mean(voltajes(i, :)
end

  % Gráfica de resultados
  figure;
  hold on;
  colors = ['r', 'g', 'b']; % Colores para los pesos
for i = 1:length(fuerzas)
    plot(1:num_pasos, voltajes(i, :), colors(i), 'DisplayName', sprint
end
```

**Anexo 15.** Código Matlab del cálculo de la energía mecánica total

```
% Parámetros iniciales del sistema piezoeléctrico y mecánico
g = 9.81; % Aceleración de la gravedad (m/s^2)
h = 0.05; % Altura desplazada por el centro de masa en metros
v = 1.5; % Velocidad promedio del cuerpo al caminar (m/s)
k = 500; % Constante elástica del sistema piezoeléctrico (N/m)
x = 0.01; % Deformación del material piezoeléctrico (m)

% Propiedades del piezoeléctrico (Modelo 3B35)
g33 = 27e-3; % Constante piezoeléctrica (Vm/N)
d_33 = 460e-12; % Constante de carga piezoeléctrica (m^2/N)
epsilon_t = 1850; % Constante dieléctrica relativa
epsilon_0 = 8.854e-12; % Permisividad del vacío (F/m)
d_piezo = 35e-3; % Diámetro del material piezoeléctrico (m)
A_piezo = pi * (d_piezo / 2)^2; % Área efectiva del material (m^2)
h_piezo = 1e-3; % Espesor del material piezoeléctrico (m)
C_piezo = epsilon_t * epsilon_0 * A_piezo / h_piezo; % Capacitancia d
R_piezo = 1e9; % Resistencia interna del material (Ω)

% Configuración de pesos y pasos
peso_base = 70; % Peso base en kg
num_pasos = 100; % Número de pasos
variaciones = randi([5, 10], 1, num_pasos); % Variación aleatoria de
pesos_variados = peso_base + variaciones; % Peso total para cada paso

% Frecuencia de pasos
f_pasos = 2.6e3; % Frecuencia de pasos en Hz (2.6 kHz)

% Inicialización de variables
E_C = zeros(1, num_pasos); % Energía cinética
E_PG = zeros(1, num_pasos); % Energía potencial gravitatoria
E_PE = zeros(1, num_pasos); % Energía potencial elástica
E_M = zeros(1, num_pasos); % Energía mecánica total
V = zeros(1, num_pasos); % Voltaje generado
I = zeros(1, num_pasos); % Corriente generada
P = zeros(1, num_pasos); % Potencia generada
E_step = zeros(1, num_pasos); % Energía transferida por paso
```

```
% Cálculo para cada paso
for j = 1:num_pasos
    % Peso y fuerza actuales
    m = pesos_variados(j); % Masa actual en kg
    F = m * g; % Fuerza generada por la masa (N)

    % Energías mecánicas
    E_C(j) = 0.5 * m * v^2; % Energía cinética (J)
    E_PG(j) = m * g * h; % Energía potencial gravitatoria (J)
    E_PE(j) = 0.5 * k * x^2; % Energía potencial elástica (J)
    E_M(j) = E_C(j) + E_PG(j) + E_PE(j); % Energía mecánica total (J)

    % Voltaje generado
    V(j) = g33 * h_piezo * (F / A_piezo);

    % Impedancia total del material
    X_C = 1 / (2 * pi * f_pasos * C_piezo); % Reactancia capacitiva (
    Z_piezo = sqrt(R_piezo^2 + X_C^2); % Impedancia total (Ω)

    % Corriente generada
    I(j) = V(j) / Z_piezo; % Corriente generada (A)


    % Potencia generada
    P(j) = V(j) * I(j); % Potencia generada (W)

    % Energía transferida por paso
    E_step(j) = P(j) / f_pasos; % Energía transferida por paso (J)
end
```

**Anexo 16.** Código Matlab para cálculo de voltaje con respecto a la distribución del peso en el pie.

```
% Parámetros iniciales
g = 9.81; % Aceleración de la gravedad (m/s^2)
m = 70; % Masa promedio de la persona (kg)
area_total_cm2 = 200; % Área total de la planta del pie (cm^2)
area_total_m2 = area_total_cm2 * 10^(-4); % Convertir a m^2
g33 = 25e-3; % Constante piezoeléctrica (Vm/N)
h_piezo = 1e-3; % Espesor del material piezoeléctrico (m)
d_piezo = 23e-3; % Diámetro del material piezoeléctrico (m)
A_piezo = pi * (d_piezo / 2)^2; % Área efectiva del material piezoeléc

% Distribución de presión relativa en la planta del pie
pressure_distribution = [
    0.9, 0.8, 0.7; % Talón
    0.7, 0.6, 0.5; % Arco
    0.5, 0.4, 0.3  % Metatarso y dedos
]; % Presión relativa (simulada)

% Normalizar la distribución
pressure_distribution = pressure_distribution / sum(pressure_distribut


% Calcular presión absoluta (Pa)
F = m * g; % Fuerza total (N)
pressure_absolute = pressure_distribution * F / area_total_m2; % Presi

% Calcular voltaje generado (V)
voltages = g33 * h_piezo * (pressure_absolute / A_piezo);

% Crear una forma de pie usando un grid
[X, Y] = meshgrid(1:size(pressure_distribution, 2), 1:size(pressure_di
```

```
% Gráfico de presión en forma de pie
figure;
subplot(1, 2, 1);
contourf(X, Y, pressure_absolute, 20, 'LineColor', 'none'); % Mapa de
colorbar;
title('Distribución de Presión (Pa)');
xlabel('Ancho del pie');
ylabel('Largo del pie');
xticks(1:3);
yticks(1:3);
xticklabels({'Zona 1', 'Zona 2', 'Zona 3'});
yticklabels({'Talón', 'Arco', 'Metatarso'});
axis equal;

% Gráfico de voltaje en forma de pie
subplot(1, 2, 2);
contourf(X, Y, voltages, 20, 'LineColor', 'none'); % Mapa de calor
colorbar;
title('Generación de Voltaje (V)');
xlabel('Ancho del pie');
ylabel('Largo del pie');
xticks(1:3);
yticks(1:3);
```

**Anexo 17.** Datos obtenidos durante las pruebas de funcionamiento.

| Pasos | Voltaje 69kg | Voltaje 84.55kg | Voltaje 60.25kg |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 0,5 | 0,26 | 0,73 |
| 3 | 0,88 | 0,97 | 0,83 |
| 4 | 1,15 | 1,23 | 1,01 |
| 5 | 1,33 | 1,33 | 1,23 |
| 6 | 1,44 | 1,56 | 1,32 |
| 7 | 1,58 | 1,67 | 1,33 |
| 8 | 1,58 | 1,83 | 1,46 |
| 9 | 1,84 | 1,88 | 1,50 |
| 10 | 1,94 | 1,87 | 1,55 |
| 11 | 1,94 | 1,94 | 1,56 |
| 12 | 2,07 | 1,94 | 1,56 |
| 13 | 2,08 | 1,98 | 1,63 |
| 14 | 2,11 | 1,99 | 1,69 |
| 15 | 2,05 | 2,00 | 1,65 |
| 16 | 2,09 | 2,17 | 1,57 |
| 17 | 2,08 | 2,22 | 1,67 |
| 18 | 2,18 | 2,19 | 1,68 |
| 19 | 2,18 | 2,29 | 1,68 |
| 20 | 2,27 | 2,27 | 1,73 |
| 21 | 2,27 | 2,23 | 1,67 |
| 22 | 2,34 | 2,23 | 1,71 |
| 23 | 2,28 | 2,21 | 1,67 |
| 24 | 2,29 | 2,26 | 1,67 |
| 25 | 2,11 | 2,26 | 1,72 |
| 26 | 2,14 | 2,32 | 1,75 |
| 27 | 2,17 | 2,37 | 1,71 |
| 28 | 2,24 | 2,41 | 1,61 |
| 29 | 2,19 | 2,34 | 1,67 |
| 30 | 2,24 | 2,39 | 1,65 |
| 31 | 2,36 | 2,38 | 1,70 |
| 32 | 2,41 | 2,32 | 1,74 |
| 33 | 2,41 | 2,36 | 1,69 |

| Pasos | Voltaje 69kg | Voltaje 84.55kg | Voltaje 60.25kg |
|---|---|---|---|
| 34 | 2,39 | 2,43 | 1,73 |
| 35 | 2,38 | 2,44 | 1,68 |
| 36 | 2,43 | 2,49 | 1,73 |
| 37 | 2,41 | 2,46 | 1,73 |
| 38 | 2,36 | 2,46 | 1,60 |
| 39 | 2,31 | 2,51 | 1,61 |
| 40 | 2,28 | 2,65 | 1,70 |
| 41 | 2,24 | 2,66 | 1,66 |
| 42 | 2,26 | 2,77 | 1,71 |
| 43 | 2,3 | 2,73 | 1,68 |
| 44 | 2,34 | 2,78 | 1,72 |
| 45 | 2,41 | 2,67 | 1,67 |
| 46 | 2,41 | 2,27 | 1,70 |
| 47 | 2,38 | 1,96 | 1,74 |
| 48 | 2,39 | 1,72 | 1,78 |
| 49 | 2,32 | 1,53 | 1,78 |
| 50 | 2,31 | 1,53 | 1,72 |

**Anexo 18.** Obtención de datos durante las pruebas de funcionamiento, 150 PPM con peso de 69 Kg

| Pasos | Voltaje 69kg 150 ppm |
|---|---|
| 1 | 0 |
| 2 | 0,75 |
| 3 | 1,12 |
| 4 | 1,37 |
| 5 | 1,37 |
| 6 | 1,73 |
| 7 | 1,89 |
| 8 | 1,91 |
| 9 | 2,1 |
| 10 | 2,12 |
| 11 | 2,11 |
| 12 | 2,2 |
| 13 | 2,37 |
| 14 | 2,45 |
| 15 | 2,5 |
| 16 | 2,55 |
| 17 | 2,65 |
| 18 | 2,65 |
| 19 | 2,67 |
| 20 | 2,76 |
| 21 | 2,82 |
| 22 | 2,82 |
| 23 | 2,8 |
| 24 | 2,94 |
| 25 | 2,97 |
| 26 | 3,01 |
| 27 | 3,12 |
| 28 | 3,12 |
| 29 | 3,1 |
| 30 | 3,1 |
| 31 | 3,3 |
| 32 | 3,3 |
| 33 | 3,33 |
| 34 | 3,49 |
| 35 | 3,48 |

| Pasos | Voltaje 69kg 150 ppm |
|---|---|
| 36 | 3,39 |
| 37 | 2,94 |
| 38 | 3,1 |
| 39 | 3,3 |
| 40 | 3,3 |
| 41 | 3,33 |
| 42 | 3,49 |
| 43 | 3,48 |
| 44 | 3,39 |
| 45 | 2,95 |
| 46 | 3,1 |
| 47 | 3,3 |
| 48 | 3,3 |
| 49 | 3,33 |
| 50 | 3,49 |