

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Electricidad

**IMPLEMENTAR GENERADOR PIEZOELÉCTRICO EN EL SILLÍN Y  
MANILLAR DE UNA BICICLETA PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA  
MECÁNICA A ELÉCTRICA**

Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo a la obtención  
del título de grado de Ingeniero Eléctrico

**AUTOR:**

Edwin Jhonatan Yautibug Guacho

**DIRECTOR:**

MSc. Julio Esteban Guerra Masson MSc.

Ibarra- Ecuador

2023



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

### 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			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100448004-0		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Yautibug Guacho Edwin Jhonatan		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Ibarra		
<b>EMAIL:</b>	ejyautibugg@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	062933514	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0980380522

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	IMPLEMENTAR GENERADOR PIEZOELÉCTRICO EN EL SILLÍN Y MANILLAR DE UNA BICICLETA PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA A ELÉCTRICA
<b>AUTOR (ES):</b>	Yautibug Guacho Edwin Jhonatan
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	1/12/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b>  <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Eléctrico
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Julio Estevan Guerra Masson MSc.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

#### 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 1 días del mes de diciembre de 2023

**EL AUTOR:**

Yautibug Guacho Edwin Jhonatan



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS

### ACEPTACION DEL DIRECTOR

Ing. Julio Estevan Guerra Masson MSc.

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante Yautibug Guacho Edwin Jhonatan, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE GENERADOR PIEZOELÉCTRICO EN EL SILLÍN Y MANILLAR DE UNA BICICLETA PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA ELÉCTRICA"** para la obtención del título de ingeniero eléctrico

Ing. Julio Guerra MSc.  
director de trabajo de grado

## **Dedicatoria**

Todo el tiempo y esfuerzo que he invertido en el desarrollo del presente trabajo está dedicado de manera especial a mis queridos padres, hermanos, hermana, esposa e hijos. Ellos han sido y continúan siendo la razón fundamental por la cual he logrado alcanzar mis metas. Agradezco profundamente por brindarme un apoyo incondicional cada día, su constante aliento ha sido mi motor y motivación.

## **Agradecimiento**

Deseo expresar mi más sincero sentimiento de gratitud y respeto a todos aquellos que han contribuido de manera significativa para hacer realidad esta anhelada meta. Quiero comenzar agradeciendo al MSc. Julio Guerra, cuya calidad humana, comprensión y dirección en esta tesis han sido fundamentales para guiarme hacia su culminación de manera correcta y exitosa.

Asimismo, extiendo mi reconocimiento a la Universidad Técnica del Norte, por abrirme sus puertas y brindarme una educación de alta calidad. La formación académica sólida que he recibido es un reflejo del esfuerzo de todos mis docentes, quienes no solo han compartido sus amplios conocimientos dentro y fuera de las aulas, sino que también han demostrado una notable amistad y dedicación.

De manera especial, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mis compañeros y amigos. Han sido testigos y compañeros en todos los momentos, tanto de alegría como de tristeza, vividos a lo largo de este tiempo de formación. Su apoyo y camaradería han sido invaluable y han enriquecido mi experiencia de manera inigualable.

*Yautibug Guacho Edwin Jhonatan*

# Tabla de contenido

## Contenido

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>4</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>5</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>6</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>1</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
A1. CONTEXTUALIZACIÓN .....	6
A2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
A3. JUSTIFICACIÓN .....	9
A4. ALCANCE DEL TRABAJO .....	9
A5. VIALIDAD DEL TRABAJO .....	10
A6. OBJETIVO GENERAL .....	10
A7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>12</b>
1.1 PIEZOELECTRICIDAD .....	12
1.1.1 <i>Efecto Piezoeléctrico</i> .....	12
1.1.2 <i>Materiales Piezoeléctricos</i> .....	14
1.2 PROCESO DE CONVERSIÓN .....	16
1.2.1 <i>Conversión de energía mecánica a energía eléctrica</i> .....	16
1.2.2 <i>Generadores piezoeléctricos</i> .....	17

1.3	TECNOLOGÍAS PIEZOELÉCTRICAS.....	19
1.3.1	<i>Sistemas piezoeléctricos</i> .....	20
1.3.2	<i>Fuente de recolección de energía</i> .....	21
1.3.3	<i>Tipos de configuración</i> .....	22
1.3.2	<i>Aplicaciones a sistemas eléctricos y mecánicos</i> .....	24
	SENSORES .....	25
	ACTUADORES.....	25
	TRANSDUCTORES.....	26
	ACELERÓMETROS.....	26
	<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>28</b>
	<b>DISEÑO DEL GENERADOR PIEZOELÉCTRICO PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA DEL SILLÍN Y MANILLAR DE LA BICICLETA</b> .....	<b>28</b>
2.1	METODOLOGÍA DEL PROYECTO .....	28
2.1.2	<i>Método de generación de energía a través de la fuerza ejercida en el sillín y manillar de la bicicleta</i> .....	31
2.2	GENERADOR PIEZOELÉCTRICO DE ELECTRICIDAD .....	32
2.3	DISEÑO DEL GENERADOR PIEZOELÉCTRICO.....	32
2.4	CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS ACOPLABLES AL PIEZOELÉCTRICO PZT.....	33
2.4.1	<i>Modelo matemático para los parámetros eléctricos</i> .....	33
2.4.2	<i>Modelo matemático para los parámetros mecánicos</i> .....	35
2.5	CÁLCULOS Y PRUEBAS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS.....	38
2.5.1	<i>Cálculo de voltaje de generación</i> .....	38
2.5.2	<i>Pruebas eléctricas en el elemento piezoeléctrico</i> .....	39
2.6	DISEÑO DEL GENERADOR PIEZOELÉCTRICO .....	40
2.6.1	<i>Software utilizados</i> .....	40
2.6.2	<i>Software SolidWorks</i> .....	41

2.6.3 Software Proteus 8.....	41
2.6.4 Software Arduino .....	41
2.7 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PARA LOS PIEZOELÉCTRICOS.....	42
2.7.1 Selección del material .....	42
2.7.2 Diseño del soporte .....	42
2.7.3 Diseño de la geometría .....	43
2.7.4 Diseño de los electrodos.....	43
2.7.5 Diseño de la amortiguación .....	43
2.7.6 Diseño de la carcasa .....	44
2.8 DISEÑO 3D DE LAS PARTES DE LA ESTRUCTURA .....	45
2.9 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA TRANSMITIR Y ALMACENAR LA ENERGÍA ELÉCTRICA .....	45
2.9.1 Rectificación y acondicionamiento de la señal .....	45
2.9.1.1 Amplificación de la señal .....	46
2.9.1.2 Conversión de voltaje.....	46
2.9.1.3 Almacenamiento de energía.....	46
2.9.1.4 Monitoreo y control .....	46
2.9.2 Descripción de elementos utilizados .....	47
2.9.3 Conexión del circuito.....	50
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>52</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DEL GENERADOR PIEZOELÉCTRICO .....</b>	<b>52</b>
3.1 CONEXIÓN DEL PCB DEL CIRCUITO .....	52
3.2 MONTAJE DEL SISTEMA CON LOS DISPOSITIVOS DE RECTIFICACIÓN Y ALMACENAMIENTO .....	53
3.2    ADQUISICIÓN DE DATOS DE VOLTAJE.....	54
3.2.1 Parámetros físicos del sillín y manillar de la bicicleta .....	55
3.2.2 Potencia mecánica y energía eléctrica generada .....	57
3.2.3 Energía mecánica (Em) .....	57

3.2.4 <i>Energía total generada</i> .....	58
3.3 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA GENERADA EN LA BATERÍA .....	60
3.4 ANÁLISIS DEL USO DE LA BICICLETA .....	61
3.5 APLICACIÓN DE LA ENERGÍA ALMACENA POR PARTE DEL GENERADOR PIEZO ELÉCTRICO .....	63
3.5.1 <i>Ensayo 1: Niño (Factor demandante único de 35Kg)</i> .....	63
3.5.2 <i>Ensayo 2: Joven</i> .....	65
3.5.3 <i>Ensayo 3: Adulto</i> .....	66
3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	68
3.7 RESULTANDO DEL TIEMPO DE CARGA .....	70
3.8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	71
<b>REFERENCIA</b> .....	<b>76</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Efecto piezoeléctrico positivo</i> .....	13
<b>Figura 2</b> <i>Efecto piezoeléctrico inverso</i> .....	14
<b>Figura 3</b> <i>Generador Piezoeléctrico</i> .....	18
<b>Figura 4</b> <i>Generador Electrostático</i> .....	19
<b>Figura 5</b> <i>Partes de un sensor piezoeléctrico</i> .....	20
<b>Figura 6</b> <i>Sistema Piezoeléctrico y sus partes</i> .....	21
<b>Figura 7</b> <i>Fuente de recolección de energía</i> .....	22
<b>Figura 8</b> <i>Tipo “tapa radiador”</i> .....	23
<b>Figura 9</b> <i>Tipo “viga cantiléver”</i> .....	23
<b>Figura 10</b> <i>Tipo “rueda dentada”</i> .....	24
<b>Figura 11</b> <i>Procedimiento para el diseño del generador piezoeléctrico</i> .....	28
<b>Figura 12</b> <i>Fuerza de agarre en el manillar</i> .....	31
<b>Figura 13</b> <i>Prueba de tensión</i> .....	39
<b>Figura 14</b> <i>Prueba de corriente generada por impulso directo</i> .....	40
<b>Figura 15</b> <i>Diseño de los piezoeléctricos</i> .....	42
<b>Figura 16</b> <i>Trazado de las guías para los piezoeléctricos</i> .....	43
<b>Figura 17</b> <i>Conexion en paralelo del Sillín y Manillar</i> .....	44
<b>Figura 18</b> <i>Modelado 3D, Sillín y Manillar de la bicicleta</i> .....	45
<b>Figura 19</b> <i>Circuito electrónico del sistema de transmisión y almacenamiento, conectados en paralelo para el sillín y manillar con los piezoeléctricos.</i> .....	50
<b>Figura 20</b> <i>Circuito electrónico de transmisión y sistema de almacenamiento</i> .....	51
<b>Figura 21</b> <i>PCB del sistema de rectificación, filtrado y almacenamiento de energía</i> .....	52
<b>Figura 22</b> <i>Circuito Físico del generador</i> .....	53

<b>Figura 23</b> Datos de voltaje contra el tiempo individuo 1 .....	54
<b>Figura 24</b> Datos de voltaje contra el tiempo individuo 2 .....	55
<b>Figura 25</b> Datos de voltaje contra el tiempo individuo 3 .....	55
<b>Figura 26</b> Bicicleta acoplada con los sensores piezoeléctricos y circuito .....	62
<b>Figura 27</b> Ensayo 1: Factor deformante único 35Kg .....	64
<b>Figura 28</b> Descarga con factor deformante de 35 Kg .....	64
<b>Figura 29</b> Ensayo 2: Factor deformante 50Kg .....	65
<b>Figura 30</b> Descarga con factor deformante de 50Kg .....	66
<b>Figura 31</b> Ensayo 3: Factor deformante 80Kg .....	67
<b>Figura 32</b> Descarga con factor deformante de 80Kg .....	67
<b>Figura 33</b> Resultados de generación de energía mecánica .....	69
<b>Figura 34</b> Tiempo de almacenamiento .....	71

## Indice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Material piezoeléctrico características</i> .....	38
<b>Tabla 2</b> <i>Lista de materiales para el generador piezoeléctrico</i> .....	48
<b>Tabla 3</b> <i>Datos de cada individuo para el cálculo del trabajo</i> .....	56
<b>Tabla 4</b> <i>Datos específicos de los individuos para el cálculo de la energía mecánica....</i>	58
<b>Tabla 5</b> <i>Cálculo de la energía generada primer individuo (18,41 J)</i> .....	59
<b>Tabla 6</b> <i>Cálculo de la energía generada Segundo individuo (8,90 J)</i> .....	59
<b>Tabla 7</b> <i>Cálculo de la energía generada Tercer individuo (12,74 J)</i> .....	60
<b>Tabla 8</b> <i>Tiempo de carga de la batería</i> .....	61
<b>Tabla 9</b> <i>Tabla de fracción horaria, días, minutos de uso de una bicicleta montañera ..</i>	62
<b>Tabla 10</b> <i>Resultados de la prueba : Factor deformante de 35 Kg</i> .....	65
<b>Tabla 11</b> <i>Resultados de la prueba 2 : Factor deformante de 50 Kg</i> .....	66
<b>Tabla 12</b> <i>Resultados de la prueba 3 : Factor deformante de 80 Kg</i> .....	68
<b>Tabla 13</b> <i>Energía mecánica generada</i> .....	68
<b>Tabla 14</b> <i>Energía generada</i> .....	69
<b>Tabla 15</b> <i>Tiempo de carga de la batería con energía generada</i> .....	70

## Resumen

La creciente demanda de sustituir métodos convencionales de generación eléctrica por fuentes renovables ha impulsado el desarrollo de opciones como la energía térmica, química, biológica y mecánica. Este trabajo tiene como objetivo construir un prototipo de generador eléctrico basado en cerámicas piezoeléctricas, que transforman la fuerza mecánica de compresión generada en una bicicleta por la presión del sillín y la fuerza de agarre del manillar en energía eléctrica. El diseño consta de varias etapas. Se calcularon parámetros eléctricos y mecánicos necesarios, se seleccionó el material para los discos piezoeléctricos, y se ensamblaron en el sillín y manillar. Se diseñaron sistemas electrónicos para la transmisión, rectificación y almacenamiento de la energía generada. Las pruebas revelaron que, con un peso de 35 kg, se obtuvo un promedio de 6,79 V; con 50 kg, 7,10 V; y con 80 kg, 8,55 V. Al concluir, la corriente generada se almacenó eficientemente en un banco de baterías de 12V. Los resultados alimentaron con éxito las luces LED delantera y trasera de la bicicleta durante 10 horas. Este logro destaca la efectividad del generador piezoeléctrico en la generación y almacenamiento de energía, demostrando su capacidad para satisfacer las necesidades de iluminación de la bicicleta de manera sostenible y eficiente.

**Palabras claves:** Piezoeléctricos , generadores eléctricos , parámetros eléctricos y mecánicos, transmisión , rectificación.

## **Abstract**

The growing demand to replace conventional methods of electricity generation with renewable sources has driven the development of options such as thermal, chemical, biological and mechanical energy. This work aims to build a prototype of an electrical generator based on piezoelectric ceramics, which transform the mechanical compression force generated on a bicycle by the pressure of the saddle and the grip force of the handlebars into electrical energy. The design consists of several stages. Such as the calculation of the necessary electrical and mechanical parameters, the piezoelectric material selection and they assembled into the saddle and handlebars. Electronic systems were designed for the transmission, rectification and storage of the generated energy. The tests revealed that, with a weight of 35 kg, an average of 6.79 V was obtained; with 50 kg, 7.10 V; and with 80 kg, 8.55 V. Upon completion, the generated current was efficiently stored in a 12 V battery bank. The results successfully powered the bike's front and rear LED lights for 10 hours. This achievement highlights the effectiveness of the piezoelectric generator in generating and storing energy, demonstrating its ability to meet bicycle lighting needs in a sustainable and efficient manner.

**Keywords:** Piezoelectric, electric generators, electrical and mechanical parameters, transmission, rectification.

# INTRODUCCIÓN

## A1. Contextualización

La innovación tecnológica y la necesidad de obtener energía eléctrica mediante fuentes renovables han influenciado en el desarrollo de transductores piezoeléctricos. Siendo un reto proporcionar energía eficiente y limpia para los diferentes tipos de dispositivos microelectrónicos como convencionales. En torno a esto se ha desarrollado diversos mecanismos cuando se somete a presión mecánica generan energía eléctrica. En investigaciones realizadas anteriormente se encontró a (Francisco Javier Jiménez Martínez & Vázquez, 2015) Energy Harvesting se lo lleva a cabo por un proceso por el cual la energía derivada de fuentes externas, tales como energía luminosa, energía térmica o energía mecánica, es convertida a energía eléctrica.

Sin embargo, los hermanos Curie descubrieron el efecto directo de piezoelectricidad mas no el efecto inverso, el cual fue descrito matemáticamente por el físico Gabriel Lippmann (1845-1921) en 1881 e inmediatamente confirmado experimentalmente por los hermanos Curie. Este dispositivo usaba piezoeléctricos de cuarzo para producir ondas de ultrasonido que se reflectaban en los submarinos, y luego con el tiempo de retardo de la señal se obtenía la ubicación de estos.(S. O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming., 2006).

En consecuencia, la generación de energía con el uso de los piezoeléctricos es una tecnología muy aceptable, logrando ser una alternativa. Su funcionamiento se da mediante vibraciones o golpes, la fuerza aplicada debe ser variable en el tiempo para una generación de potencia constante.

Por lo tanto, del 2010 al 2020 a nacido gran interés en investigar la recolección de la energía por vibración, desarrollando varios dispositivos microelectrónicos amplificados en parte de la ingeniería, incluyendo sensores inalámbricos, sistemas micromecánicas (MEMS) y

dispositivos electrónicos. Para la recolección de la energía se lo realiza con la conversión de la energía mecánica de vibración ambiental en energía eléctrica. utilizando métodos de conversión como la electromagnética, electrostática o piezoeléctrica.

Logrando así la recolección de energía piezoeléctrica tiene un alto efecto de acoplamiento electromecánico y no requiere de ningún voltaje externo en comparación con los otros métodos antes mencionados.

Además, la captación de la energía debe ser de mayor cantidad para así suministrar de manera más eficiente para las cargas.(Cúpich Rodríguez, Miguel y Elizondo Garza, 2020).

Actualmente, por la problemática existente sobre la contaminación ambiental, surge buscar nuevas alternativas o métodos de obtención de energía eléctrica renovable que no genere impactos al medio ambiente natural, y así disminuir los efectos que causan la contaminación en el medio ambiente.(Anurag Tiwari, 2017)

Por otra parte, los piezoeléctricos presentan dispositivos que eliminan las fuentes de vibraciones ambientales, que luego se utilizaran para alimentar pequeños dispositivos electrónicos con un requisito de potencia considerablemente menor. Se han dedicado varios artículos e investigaciones importantes al desarrollo y la comprensión de los sistemas de recolección de energía, con énfasis en la conversión piezoeléctrica para generar electricidad a partir de vibraciones.(VITERI & VELOZ, 2021)

Según (Renato Calì, Udaya Bhaskar Rongala, Domenico Camboni, Mario Milazzo, Cesare Stefanini & Oddo, 2014) mencionan el funcionamiento de los piezoeléctricos y se basa en la estructura fundamental de una red cristalina. Ciertas estructuras cristalinas tienen un equilibrio de carga con polarización negativa y positiva, que se neutraliza a lo largo de un eje polar. Cuando este equilibrio de carga se ve perturbado por una tensión externa en la red cristalina, la energía es transferida por los portadores de carga eléctrica creando una corriente en el cristal.

Con el efecto piezoeléctrico inverso, una entrada de carga externa creará un desequilibrio en el estado de carga neutra que causa tensión mecánica.

## **A2. Planteamiento del problema**

A pesar de que la generación de energía eléctrica con fuentes no renovables está en crecimiento existen energías como las mecánicas, térmicas, sonoras, etc. Que se generan en las diferentes actividades humanas que no son aprovechadas. Entre estas energías, hoy en día se encuentra un desaprovechamiento de energía mecánica producida por la presión ejercida en el sillín y vibración del manillar de la bicicleta para su conversión a energía eléctrica, ya que existe poca familiarización con este tipo de sistemas.

Actualmente se puede observar que, cuando vamos a velocidad constante, toda la potencia que damos a la bicicleta se gasta en forma de pérdidas mecánica y pérdidas aerodinámicas. Las pérdidas mecánicas se producen por la rodadura de los neumáticos con el suelo y por mover todas las partes mecánicas de la bicicleta, aproximándose a un porcentaje de un 10%.

Del mismo modo, se deberá tomar en cuenta la constante de carga piezoeléctrica [m/V] (metros/Volt), la constante de tensión piezoeléctrica [Vm/N] (Volts x metros/Newton), cambios por Temperatura [Grados Celsius] y el Coeficientes de acoplamiento [m/N].

Así también, al 40% de los conductores no les resulta seguro conducir de noche, debido a la pérdida o disminución de su capacidad visual. Entre los motivos de inseguridad más frecuentes se encuentran la pérdida de capacidad visual en zonas poco iluminadas, menor contraste, mayor deslumbramiento y visibilidad borrosa.

¿Qué cantidad de energía se puede generar cuando actúa una fuerza externa en el sillín y el manillar de una bicicleta con transductores piezoeléctricos?

### **A3. Justificación**

El presente trabajo de investigación plantea realizar un análisis de la viabilidad de generar energía utilizando materiales piezoeléctricos, enfocadas en la presión del sillín y vibración del manillar producida por el movimiento de la bicicleta, con el fin de generar menos contaminación y utilizarlo como una fuente de energía para diferentes aplicaciones. Este tipo de sistemas transforman la energía mecánica en energía eléctrica y así poder ser utilizados para cargas de bajo consumo.

La importancia del desarrollo de este tipo de implementación es significativa para todos los sistemas que incluyen transductores piezoeléctricos, en el caso del funcionamiento de las luces delanteras de una bicicleta, los transductores piezoeléctricos para su desarrollo requieren ensayos de rendimientos reales.

El generador nos permitirá obtener datos de diferentes parámetros de corriente y voltaje para esto es importante contar con una herramienta que nos permita ver su comportamiento.

Así también, la capacidad motriz humana mediante medios de desplazamiento como son las bicicletas ya que generan una cantidad considerable de energía mecánica que puede ser aprovechada por los materiales piezoeléctricos para cargar una batería que puede servir para carga de dispositivos pequeños o luminarias.

### **A4. Alcance del trabajo**

El presente trabajo de titulación está orientado en la implementación de un generador piezoeléctrico en el sillín y manillar de una bicicleta para la conversión de energía mecánica a eléctrica.

Para esto se realizará un análisis de los sistemas y tecnologías de generación eléctrica junto a un modelo matemático para determinar los parámetros de diseño y materiales a utilizarse en la fabricación del generador piezoeléctrico.

El modelo del diseño del generador piezoeléctrico para la captación de energía en el sillín y manillar de la bicicleta, y el circuito que transmitirá la energía generada por los transductores piezoeléctricos se realizará en el software Proteus, para posteriormente armar el circuito que permitirá regular la potencia generada de los piezoeléctricos y también aprovechar esta potencia mediante un sistema de almacenamiento como una batería recargable de litio. El diseño del circuito de almacenamiento de energía por medio de las baterías se utilizará para un sistema de iluminación en la bicicleta montañera.

Para la elaboración del dispositivo se instalará un convertidor carga-tensión que permita convertir la carga en variaciones de voltaje, proporcionales para su posterior medición y manipulación.

Por último, se realizará la adaptación del generador piezoeléctrico en el sillín y manillar de la bicicleta, que se encenderá manualmente, toda esta energía se aprovechará para el funcionamiento de la luz delantera y trasera de la bicicleta.

#### **A5. Vialidad del trabajo**

En este trabajo de grado se presenta una alternativa viable que emplea dispositivos piezoeléctricos para la captación de energía eléctrica en los asientos y manillares de bicicletas. Se considera el uso cotidiano de la bicicleta como medio de transporte para proponer prototipos adecuados, aplicando los principios de la piezoelectricidad como una solución práctica para generar energía eléctrica limpia y adecuada para sistemas de baja potencia.

#### **A6. Objetivo general**

Implementar generador piezoeléctrico en el sillín y manillar de una bicicleta para la conversión de energía mecánica a eléctrica mediante la presión y vibración ejercida al manejar.

## **A7. Objetivos específicos**

- Describir los sistemas y tecnologías de generación eléctrica con transductores piezoeléctricos.
- Diseñar el generador piezoeléctrico para la captación de energía mecánica del sillín y manillar de la bicicleta.
- Implementar el generador piezoeléctrico para pruebas de funcionamiento.

## CAPITULO 1

### Sistemas y tecnologías de generación piezoeléctrico

El presente capítulo tiene como objetivo presentar los conceptos sobre los sistemas y tecnologías de generación piezoeléctrica, tales como efecto piezoeléctrico, materiales piezoeléctricos, proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica, tecnología y fuentes de recolección de energía.

#### 1.1 Piezoelectricidad

La transición a energías alternativas es crucial para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar su impacto ambiental. Estas opciones ofrecen soluciones más sostenibles y limpias. (Castellanos, 2013). Existen diversos sistemas de generación de energía, como el triboeléctrico, piroeléctrico y piezoeléctrico, que aprovechan propiedades específicas para convertir la energía mecánica en eléctrica. (Wang, 2020).

La piezoelectricidad es una propiedad de ciertos materiales, como algunos cristales, que les permite generar una carga eléctrica en respuesta a la aplicación de una presión mecánica. De manera inversa, estos materiales también pueden deformarse en respuesta a un campo eléctrico externo. (Salem, 2023). Al aplicar fuerza mecánica al material piezoeléctrico, los iones en su estructura cristalina se desplazan, generando una polarización eléctrica. Esto resulta en una diferencia de potencial en la superficie del material, creando una carga positiva y una carga negativa.

##### 1.1.1 Efecto Piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico se origina por la polarización eléctrica en materiales piezoeléctricos, no por su deformación. Estos materiales exhiben dos dominios clave: el efecto

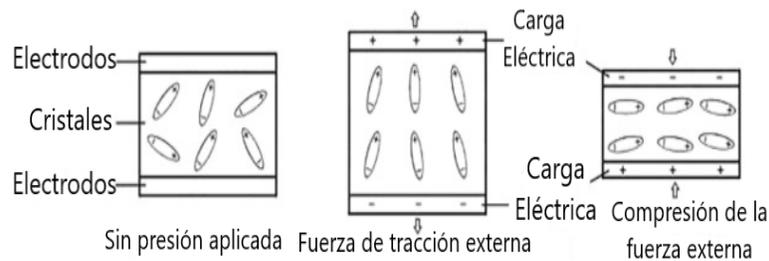
positivo y el inverso, aprovechables para la generación de energía eléctrica y la fabricación de dispositivos electrónicos. (Kokkinopoulos, 2014).

### Efecto piezoeléctrico positivo

El efecto piezoeléctrico positivo se manifiesta al aplicar una fuerza externa en una dirección específica, induciendo la polarización del cristal y generando cargas positivas y negativas en sus superficies. Al retirar la fuerza externa, el cristal retorna a su estado original, sin carga eléctrica, como se ilustra en la figura 1. (Yongling et.al, 2021).

**Figura 1**

*Efecto piezoeléctrico positivo*



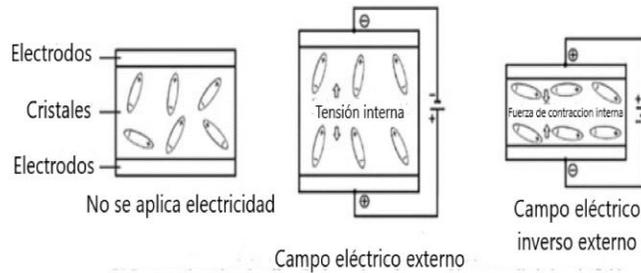
*Nota:* Adaptado de “Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics” (p.211), por (Yongling et.al, 2021), Materials & Design. La figura ilustra el fenómeno físico que experimentan los cristales al ser sometidos a una acción externa, resultando en su polarización y la consecuente aparición de una diferencia de potencial eléctrico, así como cargas en sus terminales.

### Efecto piezoeléctrico inverso

El efecto piezoeléctrico inverso, tal como se observa en la figura 2, se produce cuando se aplica una deformación mecánica a un cristal piezoeléctrico, lo que genera una carga eléctrica en sus superficies. La magnitud de la carga eléctrica generada depende del tamaño y la amplitud de la deformación mecánica aplicada (Yongling et.al, 2021).

## Figura 2

### *Efecto piezoeléctrico inverso*



*Nota:* Adaptado de “Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics” (p.211), por (Yongling et.al, 2021), *Materials & Design*. Cuando el cristal se encuentra bajo la presión de una fuerza externa o bajo influencia de un campo eléctrico en las caras del cristal, las dimensiones del cristal varían.

### 1.1.2 Materiales Piezoeléctricos

Actualmente, se ha detectado el fenómeno de la piezoelectricidad en varios tipos de materiales; los minerales naturales como: el cuarzo, la turmalina, el topacio y la sal de Rochelle (tetrahidrato de tartrato de sodio y potasio, o  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), A si también, los cristales piezoeléctricos simples como: el dihidrofosfato amónico  $[\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4]$ , el ortofosfato de galio  $[\text{GaPO}_4]$ , óxidos complejos de galio y lantano, generada de forma sintética (Bhavsar, 2021).

Los materiales piezoeléctricos están divididos en 2 grandes grupos naturales o sintético.

- Materiales piezoeléctricos naturales.
- Materiales piezoeléctricos sintético.

#### ➤ **Materiales Naturales**

Existen cristales o minerales piezoeléctricos naturales que se encuentran en la naturaleza. Sin embargo, debido a que su capacidad de generación eléctrica es muy baja y sus propiedades no varían con el tiempo, no son recomendables para su uso en sistemas de almacenamiento de

energía. Algunos ejemplos de cristales piezoeléctricos naturales incluyen el cuarzo, la turmalina y la sal de Rochelle.

- **Cuarzo**

El monocristal de cuarzo, al ser sometido a tracción o presión, experimenta una separación de cargas en su estructura, lo que resulta en una polarización de carga. La corriente generada en el cristal es proporcional al área de la superficie y a la rapidez con la que se aplica la presión de forma ortogonal.

- **Turmalina**

La turmalina pertenece al grupo de ciclosilicatos con la composición  $(\text{Na, Ca})(\text{Al, Fe, Li})(\text{Al, Mg, Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH, F})_4$  posee propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas, esto quiere decir que tiene la propiedad de acumular cargas opuestas en sus dos extremos sea por presión o por calentamiento.

- **Sal de Rochelle**

Es una de las sales más estables del ácido tartárico, conservando su integridad sin sufrir alteraciones con el tiempo, solubles en agua y prácticamente insolubles en alcohol. Su composición química es:  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (Peña, 2008).

- **Material sintético**

Las cerámicas piezoeléctricas son ampliamente utilizadas y se encuentran fácilmente en nuestro entorno. Son relativamente económicas, químicamente estables, robustas y no se ven afectadas por el ruido térmico. Además, es posible modificar sus propiedades para controlar los coeficientes de  $p$ ,  $\epsilon$ ,  $\tan \delta$  y  $\sigma$  (conductividad) (Jiménez, 1995).

En la actualidad, los óxidos perovskitas, como el  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  (PZT), son los materiales piezoeléctricos más utilizados debido a su estructura y rendimiento en diversas aplicaciones. Sin

embargo, presentan ciertas limitaciones. Desde esta perspectiva, se ha desarrollado un nuevo diseño químico sólido tipo perovskita con MPBs (Multilayered Polar Boundaries) ferroeléctricos que aumentan la temperatura de Curie y permiten controlar los defectos y propiedades del material. Como resultado, se ha logrado obtener el  $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$ , que es adecuado para su uso en altos voltajes o en aplicaciones que requieren una sensorización precisa, incluso a temperaturas de funcionamiento de hasta  $400^\circ\text{C}$ . (Alguero, 2022).

Las cerámicas de PZT se clasifican en dos grupos: "Hard" (duras) y "Soft" (blandas). Las cerámicas de PZT duras pueden soportar niveles elevados de excitación eléctrica, lo que las hace ideales para transductores de alto voltaje. Por otro lado, las cerámicas de PZT blandas se caracterizan por tener una alta permisividad, lo cual las hace favorables para sensores y actuadores. (Londoño et al., 2012).

## **1.2 Proceso de conversión**

Los dispositivos piezoeléctricos, electroópticos y piroeléctricos son convertidores de energía. En el caso de los dispositivos piezoeléctricos, tanto una tensión mecánica como una temperatura lo suficientemente intensas pueden inducir la polarización del material. Cuando se retira la tensión, el material vuelve a su estado normal. En este contexto, el efecto piezoeléctrico directo es el más apropiado para su utilización como generador de energía

### **1.2.1 Conversión de energía mecánica a energía eléctrica**

El proceso fundamental de operación y explotación de la generación piezoeléctrica, se basa en la conversión mecánica que estos materiales producen. La captación y manipulación de la energía generada son clave para su utilización efectiva.

En este sentido, existen tres etapas fundamentales para aprovechar esta generación: la conversión, la recolección y el almacenamiento de energía para su posterior uso.

### **Coefficiente piezoeléctrico**

El coeficiente piezoeléctrico de los materiales cerámicos presenta varios parámetros y constantes. Es importante tener en cuenta que los piezoeléctricos cerámicos son anisotrópicos, lo que significa que sus constantes varían según la dirección. Estas direcciones están relacionadas con la fuerza mecánica o eléctrica aplicada. Además, cada constante posee dos subíndices que indican la dirección de la fuerza externa. En la mayoría de los casos, la dirección de la polarización piezoeléctrica coincide con el eje con dirección positiva.

Al considerar todas estas propiedades, es necesario tener en cuenta las siguientes constantes: la constante de carga/deformación piezoeléctrica, la constante de voltaje piezoeléctrica, la compliancia elástica, el coeficiente dieléctrico (permitividad) y el coeficiente de acoplamiento piezoeléctrico (Fleming & Reza Moheimani, 2006).

### **1.2.2 Generadores piezoeléctricos**

En la actualidad, se están llevando a cabo investigaciones para aprovechar las vibraciones mecánicas del entorno como fuente de generación eléctrica. Esto se logra mediante el uso de dispositivos que emplean mecanismos de transducción, como la piezoeléctrica, la electromagnética y la electrostática (Costa de Oliveira et al. 2021).

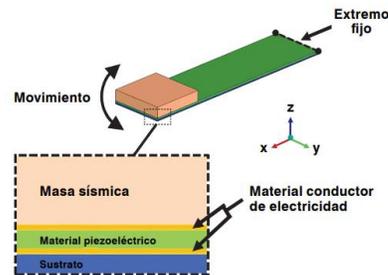
#### **Generador Piezoeléctrica**

La conversión de energía mecánica a eléctrica mediante el uso de dispositivos piezoeléctricos ha experimentado un gran avance. Se ha logrado extraer electricidad a partir de la energía del entorno, lo que permite alimentar dispositivos de baja potencia, como microscopios, dispositivos de alineación láser, sistemas de sonido y muchos otros. (Pradeesh et al. 2020).

Los transductores piezoeléctricos pueden generar energía eléctrica cuando están sujetas a deformaciones pueden ser por vibración mecánica. De acuerdo con la figura 3 un generador piezoeléctrico está compuesta por un sustrato, un piezoeléctrico y una masa sísmica.

### Figura 3

#### Generador Piezoeléctrico



*Nota:* Adaptado de “fuente de energía verde para micro dispositivos” (p.34), por Hernández et al, 2018, Vibraciones mecánicas. Trata sobre la superficie superior del sustrato y de la película piezoeléctrica se depositan películas conductoras para extraer la energía eléctrica generada.

#### Generador Electromagnética

Los elementos de transducción electromagnética son dispositivos que convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio de fuerza electromotriz, es decir, en una tensión de salida inducida en un conductor. Esto ocurre como resultado de un cambio en el flujo magnético. Estos elementos permiten la detección y medición de diferentes variables físicas y su conversión en señales eléctricas para su posterior análisis y procesamiento. (Brizuela, 2010).

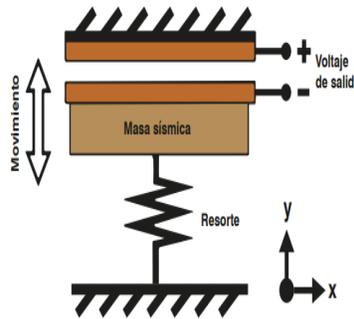
#### Generador Electrostático

Los transductores electrostáticos son dispositivos que consisten en un capacitor variable. Este capacitor modifica el valor de su capacitancia en función de cambios en la distancia entre sus electrodos metálicos paralelos, los cuales se encuentran cargados eléctricamente y separados por un dieléctrico. Estas alteraciones en la distancia de los electrodos provocan variaciones en la capacitancia, lo que a su vez genera cambios en la carga eléctrica almacenada. De esta manera, los transductores electrostáticos permiten la conversión de cambios físicos en cambios eléctricos, y se utilizan en diversas aplicaciones como micrófonos y altavoces. (Hernández et al. 2018).

La distancia entre las placas puede variar modificando las vibraciones y provocando una variación de la capacitancia como en la Figura 4.

#### Figura 4

##### *Generador Electrostático*



*Nota:* Adaptado de “fuente de energía verde para micro dispositivos” (p.34), por Hernández et al, 2018, Vibraciones mecánicas. Se representa el esquemático de un generador electrostático y sus componentes.

### 1.3 Tecnologías Piezoeléctricas

En la actualidad, el avance tecnológico nos impulsa a investigar y aprovechar nuevos materiales presentes en nuestro entorno para la generación de energía limpia. Es importante considerar los materiales piezoeléctricos y sus propiedades para utilizarlos de manera adecuada. Se busca combinar estas tecnologías con otras para maximizar la generación y conversión de energía, minimizando las pérdidas y logrando una transmisión eficiente hacia los sistemas de almacenamiento. De esta manera, es posible desarrollar dispositivos que cumplan con las características requeridas en su diseño e implementación.

Las investigaciones se han enfocado en aprovechar la energía mecánica generada por la energía cinética y potencial, convirtiéndola en energía eléctrica confiable que satisfaga las demandas energéticas requeridas. Este enfoque busca impulsar el desarrollo de soluciones que

contribuyan a cubrir las necesidades de energía de manera más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

## Sensores

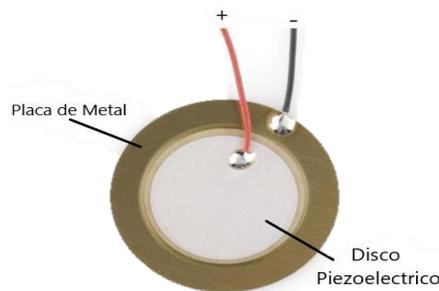
Los sensores piezoeléctricos son dispositivos fundamentales para medir procesos como presión y fuerza, ya que aprovechan las variaciones en las propiedades del material. Estos sensores desempeñan un papel crucial en diversas áreas, tanto en el ámbito médico como en el industrial. (Fernandez Galeano, 2018).

Los sensores piezoeléctricos son versátiles para medir fuerzas mecánicas (presión, fuerza, movimiento), está compuesta por 3 partes esenciales como podemos observar en la Figura 5.

- Placa de metal - Material Piezoeléctrico - Cables (Positivo y Negativo)

### Figura 5

*Partes de un sensor piezoeléctrico*



*Nota:* Adaptado de “Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza “(p.11), por (Fernandez Galeano, 2018), Universidad Politécnica de Valencia. Se observa el Sensor piezoeléctrico para facilitar la lectura del voltaje de salida, con dos chapas muy finas de distintos metales o una capa fina de cerámica u otro cristal.

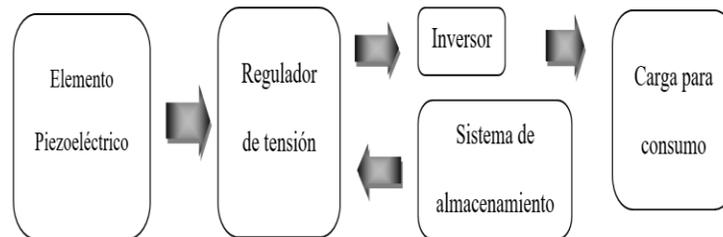
#### 1.3.1 Sistemas piezoeléctricos

Al momento de desarrollar un sistema piezoeléctrico necesitamos tomar en cuenta el diseño e implementación del generador de energía con sus partes como: Elemento piezoeléctrico,

Regulador de tensión, inversor, sistema de almacenamiento y carga para consumo, como se puede ver en la Figura 6.

### Figura 6

*Sistema Piezoeléctrico y sus partes*



*Nota:* En la figura podemos observar el esquema de un sistema piezoeléctrico para el proceso de generación de energía mecánica a eléctrica.

### Regulador de voltaje

El regulador de voltaje tiene como función principal mantener un voltaje de salida constante y seguro utilizando componentes electromagnéticos. Su objetivo es evitar daños al equipo al transmitir un nivel de voltaje adecuado. Existen diferentes tipos de reguladores de voltaje, siendo los más comunes el regulador lineal y el regulador conmutado.

#### Regulador lineal

El regulador lineal ajusta el voltaje de salida a través de un dispositivo de regulación que disipa el exceso de energía en forma de calor. Proporciona una regulación precisa, pero puede generar pérdidas de energía significativas debido a la disipación de calor.

#### Regulador conmutado

A diferencia del otro tipo de regulador, este es más eficiente por sus características como minimizar la pérdida de potencia, tamaño de fuente de alimentación, menor disipación de calor, otorgando una eficiencia del 90%.

### 1.3.2 Fuente de recolección de energía

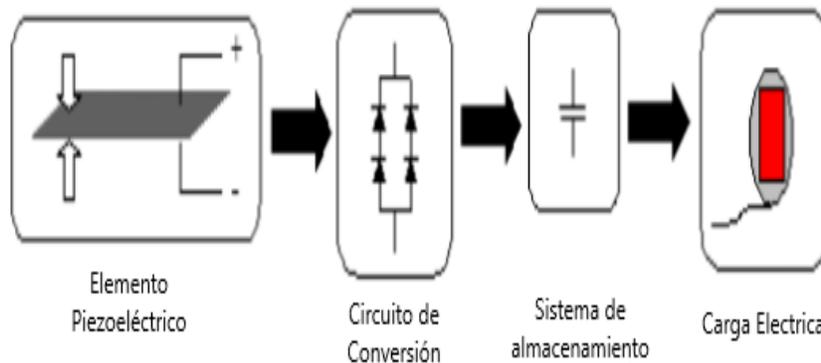
En la actualidad, se han desarrollado dispositivos electrónicos autónomos a pequeña escala que son capaces de autoalimentarse utilizando diversas fuentes de energía disponibles en el entorno. Estos dispositivos aprovechan la conversión de energía ambiental proveniente de diferentes fuentes, tales como la vibración, el calor, la energía solar, el viento, los flujos de agua y las ondas de radiofrecuencia. (Peddigari et al. 2021).

La recolección de energía se efectúa por efecto piezoeléctrico directo sin una fuente de alimentación o imán permanente, la recolección de energía piezoeléctrica es más prominente generando una mayor densidad de potencia de salida en comparación a los recolectores electromagnéticas, electrostática y triboeléctrica (Latif et al. 2021).

De acuerdo con la figura 7 se observa una fuente de recolección de energía con sus partes para su proceso de almacenamiento de energía.

**Figura 7**

*Fuente de recolección de energía*



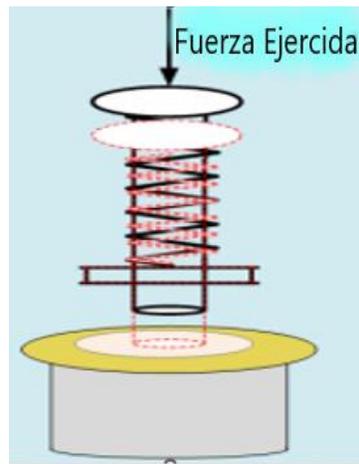
*Nota:* Adaptado de "Experimental comparison of piezoelectric rectifying circuits for energy harvesting,"(p.1), Por (Mustapha et al. 2016), IEEE Student Conference on Research and Development.

### 1.3.3 Tipos de configuración

En la conversión de energía mecánica a eléctrica mediante el uso de materiales piezoeléctricos, se produce una deformación en el material que provoca cambios en sus propiedades eléctricas. En este proceso, se pueden distinguir tres tipos principales de configuraciones. El primer tipo, es conocida como “tapa de radiador”, como se observa en la figura 8, es accionada por una fuerza externa y su sistema de resortes que ayuda a regresar a su estado original al piezoeléctrico (Gonzales, 2012). El segundo tipo, se la conoce como estructura cantiléver, de acuerdo con su funcionamiento como viga, sostenida en un extremo y libre del lado contrario, deformándose al recibir una fuerza externa vertical. Eliminada la fuerza externa la viga vuelve a su estado original, (Gonzales, 2012), tal como se observa en la figura 8.

### **Figura 8**

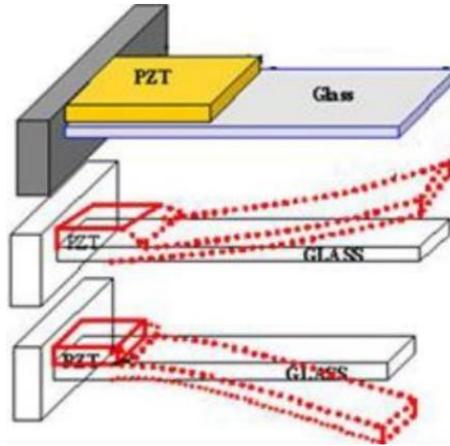
*Tipo “Tapa Radiador”*



*Nota:* Adaptado de “EnergyMove: diseño de un dispositivo piezoeléctrico para harvesting de energía humana “(p.40), por (Gonzales, 2012), Universidad Particular de Loja.

### **Figura 9**

*Tipo “Viga Cantiléver”*

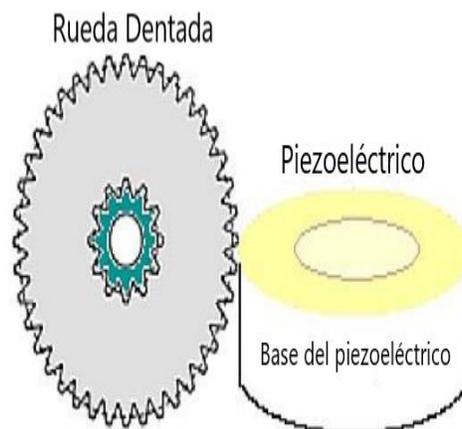


*Nota:* Adaptado de “EnergyMove: diseño de un dispositivo piezoeléctrico para harvesting de energía humana “(p.40), por (Gonzales, 2012), Universidad Particular de Loja.

En el tercer tipo, se aprovecha la vibración del piezoeléctrico ocasionado por la rueda dentada, de acuerdo con la figura 10.

### **Figura 10**

*Tipo “Rueda Dentada”*



*Nota:* Adaptado de “EnergyMove: diseño de un dispositivo piezoeléctrico para harvesting de energía humana “(p.40), por (Gonzales, 2012), Universidad Particular de Loja.

### **1.3.2 Aplicaciones a sistemas eléctricos y mecánicos**

Las aplicaciones con sistemas eléctricos y mecánicos mediante el efecto piezoeléctrico no es realmente algo nuevo, las propiedades y parámetros que manejan han creado el interés de crear nuevas aplicaciones aprovechando el efecto piezoeléctrico.

Asiendo, que este tipo de material sean idóneos como sensor o actuador interactuando con diferentes tipos de señales, un claro ejemplo es el mechero por su forma de funcionamiento como actuador, al momento de aplicar fuerza en la palanca al mismo tiempo el piezoeléctrico recibe presión, ocasionando una chispa que choca con el gas y lo prende. Así también, está presente en los micrófonos, altavoces o auriculares e inyectores de combustible piezoeléctrico.

En la actualidad, el campo de la tecnología ha avanzado de gran manera desarrollando dispositivos tecnológicos de bajo consumo como (sensores, transductores, generadores, actuadores, acelerómetros) en las cuales se observa el uso de los piezoeléctricos.

### **Sensores**

Los sensores piezoeléctricos también conocida como microbalanzas de cristal de cuarzo son utilizadas en algunas áreas de investigación como: alimenticia, medica, ambiental, etc.

Su funcionamiento se da en el momento de ejercer una fuerza el material se dé forma, generando un campo eléctrico en su superficie para poder transformar la energía mecánica en eléctrica. Además, los sensores funcionan como guías de ondas acústicas respondiendo a la variación de propiedades físicas de entrada como: temperatura, luz, movimiento, humedad, masa en la superficie o viscosidad de fluidos sumergidos y como salida se suele obtener una señal eléctrica (De Sousa & Manganiello, 2018), para ser transmitida a través de una red se debe realizar su procesamiento.

### **Actuadores**

Los actuadores piezoeléctricos son dispositivos utilizados para convertir la energía mecánica en eléctrica mediante el efecto piezoeléctrico, permitiendo lograr un desplazamiento en micrómetros con resoluciones de nanómetros, a través de la deformación de mecanismos flexibles accionados al piezoeléctrico (Masch et al. 2022).

## **Transductores**

El transductor es el dispositivo encargado de recibir la energía mecánica y convertirla en energía eléctrica. Este dispositivo es ampliamente utilizado debido a su capacidad para transformar un tipo de energía en otro. El transductor genera cambios en sus propiedades físicas a partir de una propiedad física ejecutada sobre él. Esta propiedad física puede ser óptica, térmica, eléctrica, entre otras. En otras palabras, el transductor actúa como un intermediario que realiza la conversión de energía de un tipo a otro.

$$\text{TIPO DE ENERGÍA} = \text{TRANSDUCTOR} = \text{OTRO TIPO DE ENERGÍA}$$

En la actualidad, podemos encontrar el uso de transductores en una amplia variedad de dispositivos y aplicaciones. Algunos ejemplos comunes incluyen teléfonos móviles, micrófonos, altavoces y bombillas fluorescentes.

## **Acelerómetros**

Los acelerómetros piezoeléctricos suelen ser modelados como sistemas lineales de segundo orden. Estos sistemas pueden ser descritos mediante su función de transferencia o su función de respuesta de frecuencia (Cabrera Gómez & Palomino Marín, 2001).

Los acelerómetros son dispositivos que funcionan mediante el efecto piezoeléctrico, ante la presencia de una fuerza externa el material piezoeléctrico se deformara, generando cargas pequeñas necesitando ser amplificadas para ser medidas siendo un inconveniente en los acelerómetros (Urueña Orellana, 2021). Además, el acelerómetro es un dispositivo utilizado para medir la aceleración gravitacional estática o dinámica causada por golpes y vibraciones de baja

frecuencia. Hay diferentes tipos de acelerómetros, como los capacitivos (MEMS), los piezorresistivos y los piezoeléctricos. Es importante destacar que los acelerómetros suelen incorporar un circuito eléctrico para generar y convertir la señal eléctrica generada por el dispositivo en una forma adecuada para su posterior manipulación o uso.

### **Generadores**

Un generador piezoeléctrico captura la energía mecánica del ser humano y la convierte en energía eléctrica. Debemos diferenciarlos, con los otros dispositivos por su capacidad de transformar la mayor cantidad de energía mecánica a energía eléctrica.

Para desarrollar el diseño de un generador piezoeléctrico se debe tomar en cuenta la fuente energética, superficie (forma del generador) y dimensiones. Además, es muy importante determinar la captación de la energía mecánica (Fuerza aplicada), la compresión (efecto piezoeléctrico) y energía eléctrica de salida.

## CAPITULO 2

### Diseño del generador piezoeléctrico para la captación de energía mecánica del sillín y manillar de la bicicleta

En este capítulo se presenta el diseño del generador piezoeléctrico y el adecuado almacenamiento de la energía generada. Para avanzar desde los fundamentos teóricos y seguir los objetivos planteados, se llevó a cabo el diseño y la simulación de manera sistemática, paso a paso, del generador piezoeléctrico y recolección de energía.

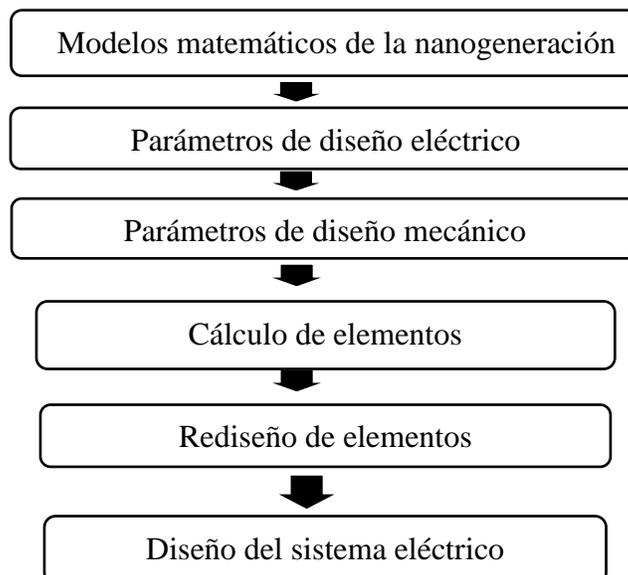
#### 2.1 Metodología del proyecto

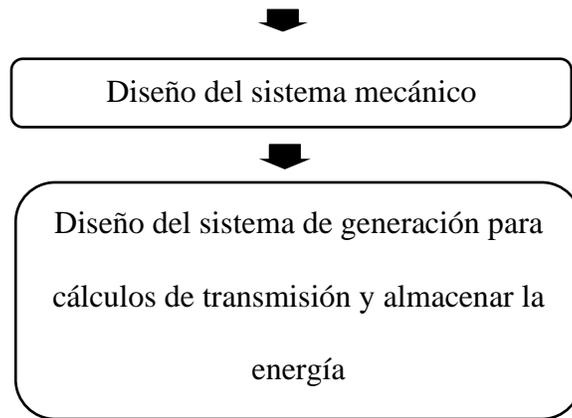
Para llevar a cabo este trabajo, se utilizó una metodología que permitió realizar la investigación de manera ordenada, lógica y técnica. A través de esta metodología se determinó las técnicas y el proceso necesario para llevar a cabo el estudio de manera eficiente.

El desarrollo del trabajo se llevará a cabo siguiendo el siguiente procedimiento, dividido en las siguientes etapas como se muestra en la figura 11.

#### Figura 11

*Procedimiento para el diseño del generador piezoeléctrico*





El propósito de este trabajo se enfoca en llevar a cabo una investigación exhaustiva mediante la consulta de fuentes de alta credibilidad, tales como Sciencedirect, IEEE, revistas científicas, artículos académicos y tesis de investigación. Estos recursos representan canales confiables que proporcionan información actualizada, lo cual resulta fundamental para el éxito de nuestro proyecto. En el desarrollo del generador piezoeléctrico, es fundamental considerar su funcionamiento, que consiste en convertir la energía mecánica en energía eléctrica aprovechando el uso de la bicicleta y la acción del ser humano como fuente de energía. Para aprovechar al máximo esta energía producida por el ser humano, es necesario realizar un análisis exhaustivo para determinar la cantidad de energía mecánica que se puede extraer. De acuerdo con los objetivos planteados de este proyecto y características de funcionamiento, se toma muy en cuenta los parámetros del material piezoeléctrico como: diámetro, nivel de stress(deformación), nivel de fuerza aplicada y resistencia del transductor piezoeléctrico. Al momento de seleccionar el dispositivo piezoeléctrico adecuado, se toma en cuenta la rigidez del material, su capacidad de deformación ante cargas dinámicas y su compatibilidad con las superficies de acoplamiento como es en nuestro caso es el sillín y manillar de la bicicleta. Al término de una evaluación exhaustiva de las propiedades de los diferentes materiales disponibles nos ayuda a elegir el más propicio para lograr una excelente generación y posterior almacenamiento de energía se nuestro proyecto.

De acuerdo con lo anterior, Para adquirir el dispositivo piezoeléctrico, es necesario obtener y revisar las fichas técnicas de diferentes proveedores. Este paso permite comparar las especificaciones y características de los dispositivos ofrecidos por cada distribuidor. Además, es importante solicitar cotizaciones a estos distribuidores para evaluar y seleccionar la opción más conveniente en términos de precio, calidad y disponibilidad.

En cuanto al desarrollo del diseño del generador se realizó varios diseños de circuitos con el material piezoeléctrico para posterior a esto se llegue a comparar y elegir el más adecuado que se adapte a nuestro a nuestro requerimiento.

Planificación detallada: para el diseño del circuito se puede seleccionar los componentes necesarios, como el regulador de energía, y conectarlos de acuerdo con el diseño teórico, así también se debe definir especificaciones como voltaje, corriente, inductancia, capacidad, resistencia, etc. Por consiguiente, para simular el generador piezoeléctrico se puede utilizar herramientas y análisis disponibles en Proteus 8 Profesional para evaluar la eficiencia del sistema y realizar ajustes si es necesario. En cuanto al almacenamiento de energía se diseña y simula el sistema de almacenamiento de energía, como una batería, para capturar y almacenar la energía generada por el generador piezoeléctrico.

### **Cálculo de fuerza de agarre**

Para calcular la fuerza de agarre de una persona se puede medir utilizando un dinamómetro de mano. La mayoría de los dinamómetros tienen mangos ajustables para asegurar un agarre firme y seguro. Para realizar la medición, se debe apretar el dinamómetro con toda la fuerza y presión de agarre. El dinamómetro proporcionará un resultado de medición en unidades de fuerza, como libras o kilogramos o también se la puede calcular mediante la Ecuación 5.

$$F_{\text{agarre}} = \mu * N \quad (5)$$

Donde:

$F_{agarre}$ : Fuerza de agarre.

$\mu$ : Coeficiente de fricción entre los neumáticos y la superficie.

$N$ : Fuerza normal, que es el peso del ciclista y la bicicleta.

## Figura 12

*Fuerza de agarre en el manillar*



*Nota:* Adaptado de Bike-components, por puño ergonómico adecuado para tu estilo de conducción,2023, Flic.kr(<https://www.bike-components.de/blog/es/comprendiendo/encuentra-el-puno-ergonomico-adecuado-para-tu-estilo-de-conduccion/>)

### 2.1.2 Método de generación de energía a través de la fuerza ejercida en el sillín y manillar de la bicicleta

La fuerza aplicada en el sillín y manillar de la bicicleta depende de muchos factores diferentes como: posición del ciclista, terreno y velocidad que circula. Por lo tanto, no existen ecuaciones determinadas para calcular este tipo de fuerza, sin embargo, se puede utilizar la segunda ley de newton para entender cuál es la fuerza aplicada en el sillín y manillar de la bicicleta ayudándonos de la Ecuación 6.

$$F = m * a \quad (6)$$

Donde:

F: Fuerza neta aplicada en el sillín y manillar.

m: Masa del objeto.

a: Aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta.

Así también es importante mencionar que la fuerza en el manillar y el sillín no son las únicas fuerzas que actúan en la bicicleta. Existen otras fuerzas como la resistencia del aire, fricción de ruedas y resistencia del terreno.

## **2.2 Generador Piezoeléctrico de electricidad**

Para el diseño de un generador piezoeléctrico se tomó en cuenta varias partes como: selección de materiales, diseño del dispositivo, construcción y pruebas. Es importante mencionar, para el diseño y construcción de un generador piezoeléctrico se requiere tener conocimientos especializados y experiencia en ingeniería, así también tomar medidas de seguridad para manipular los materiales.

Al momento de elegir la configuración piezoeléctrica más idónea y diseñar el generador debemos tomar parámetros de como: captar, transformar la energía de CA a CD y el almacenamiento de corriente continua en la batería.

## **2.3 Diseño del generador piezoeléctrico**

Primeramente, para el desarrollo del generador piezoeléctrico se analizó algunas variables como el tipo de entrada mecánica acoplada.

### **Fuerza cuasi-estática**

Es una fuerza aplicada lentamente y de manera gradual, sin sufrir cambios tanto en magnitud y dirección de la fuerza, los piezoeléctricos debido a esta fuerza convierten la energía mecánica en eléctrica de forma gradual y controlada.

### **Fuerza dinámica**

Hace referencia a la fuerza generada cuando aplicamos una carga mecánica a un material piezoeléctrico, siendo así la fuerza que más voltaje genera en comparación con la fuerza cuasi-estática.

## 2.4 Cálculos de los parámetros eléctricos y mecánicos acoplables al piezoeléctrico PZT

El PZT (Zirconato Titanato de Plomo) es un material piezoeléctrico por lo general usado debido a su alta sensibilidad, estabilidad y resistencia. Para realizar los cálculos eléctricos y mecánicos del PZT, se debe tomar en cuenta algunos parámetros como:

- Tipo de material piezoeléctrico
- Resistividad de los materiales piezoeléctricos
- Capacidad de deformación y perdidas de carga
- Fuerza aplicada al material
- Diámetros de los piezoeléctricos

### 2.4.1 Modelo matemático para los parámetros eléctricos

En el trabajo se presenta el modelo matemático y ciertos parámetros eléctricos para calcular con la Ecuación 1, y obtener valores correspondientes de tensión, corriente y potencia generada, de un grupo de piezoeléctricos.

#### Tensión eléctrica por deformación

La relación entre la tensión eléctrica y la deformación en un material piezoeléctricos es ocasionada mediante el coeficiente de piezoelectricidad, que es una constante que depende del material (tamaño) y la dirección de la fuerza en que se aplica para su deformación.

La ecuación 7 define la tensión que se genera al momento de aplicar una fuerza en un punto determinado del piezoeléctrico (Matthey, 2017).

$$V = \left(-g_{33} * h * \frac{f}{A}\right) = -\left(g_{33} * h * \left(\frac{f}{d^2 * \frac{\pi}{4}}\right)\right) \quad (7)$$

Donde:

**V:** voltaje resultante por deformación (V)

**g<sub>33</sub>:** Constante piezoeléctrica. (Vm/N)

**h:** Largo o grueso del material piezoeléctrico. (mm)

**f:** Impulso ejercido en el piezoeléctrico. (N)

**d:** Diámetro efectivo del cerámico piezoeléctrico.

**A:** Área del cerámico piezoeléctrico. (  $m^2$  ). A la fuerza aplicada sobre esta área se le denomina también nivel de estrés del material piezoeléctrico.

En el caso de un disco de PZT( Zirconato Titanato de Plomo) con un diámetro de 35mm en el diafragma y 23 mm en el cerámico, la constante piezoeléctrica se encuentra en orden de :  $25 \times 10^{-3} Vm/N$ . (Zambrano & Alves Pereira, 2004)

### **Intensidad de corriente**

La intensidad de corriente en los piezoeléctricos se genera como respuesta de la aplicación de una fuerza mecánica o deformación del material piezoeléctrico, provocando la polarización eléctrica y que aparezca una corriente eléctrica, así también, depende de varios factores como: magnitud, dirección de fuerza ejercida, geometría y propiedades del material.

La intensidad de corriente en los materiales piezoeléctricos es bastante baja y suele ser en microamperios, dependiendo del tipo de conexión como: en Paralelo el voltaje se mantiene, pero la corriente se reparte con los elementos conectados, en serie el voltaje se reparte con todos los elementos conectados y la corriente es igual en todos los elementos.

### **Potencia generada en los piezoeléctricos**

Esta potencia generada depende de la tensión y la corriente generada en el material, es decir, cantidad de energía por unidad de tiempo y se la puede calcular mediante la Ecuación 8.

$$P = (V) * (I) \quad (8)$$

Donde:

P= Potencia generada en vatios (W)

V= voltaje del circuito en voltios (V).

I= Intensidad de corriente en amperios (I).

En los materiales piezoeléctricos la potencia suele ser muy baja, sin embargo, en aplicaciones específicas como sensores y actuadoras piezoeléctricos, suelen utilizar amplificación de corriente y voltaje para aumentar la potencia. Cabe resaltar que la potencia de los piezoeléctricos no puede ser muy grandes por las limitaciones de estos piezoeléctricos.

#### **2.4.2 Modelo matemático para los parámetros mecánicos**

Los modelos matemáticos aplicados a los parámetros mecánicos de los materiales piezoeléctricos son de gran ayuda para entender, pronosticar el comportamiento en diferentes circunstancias y ser utilizados para elaborar los dispositivos piezoeléctricos.

##### **Fuerza aplicada a los piezoeléctricos**

Para el cálculo de la fuerza en los discos piezoeléctricos mediante una carga externa, que puede ser una presión, una fuerza axial o una fuerza tangencial utilizaremos la Ecuación 9.

Es importante tener en cuenta que la cantidad de fuerza mecánica que se puede aplicar a un disco piezoeléctrico está limitada por la resistencia mecánica del material y su fragilidad. Además, la aplicación de una fuerza excesiva puede provocar daños en el material y afectar su comportamiento piezoeléctrico.

$$f = m * g \quad (9)$$

Donde:

m= Masa que interactúa con el piezoeléctrico.

g=constante de gravedad (9.81  $m/s^2$ ).

##### **Energía mecánica (Em)**

Por lo tanto, la energía mecánica almacenada en un material piezoeléctrico se puede expresar en términos de la carga piezoeléctrica generada. La energía mecánica se puede calcular mediante la Ecuación 10.

**Para la constante Elastica:**  $K = \frac{F}{X}$

Peso:  $P = m \cdot g$

Deformación:  $X = 0.003m$

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$P - F = 0$$

$$P = F$$

$$P = KX$$

$$P = K \cdot 0.003$$

$$K = \frac{P}{X}$$

$$EM = EC + EPE + EPG \tag{10}$$

$$EPE = \frac{1}{2} * K * X^2 \tag{11}$$

$$EPG = m * g * h \tag{12}$$

$$EC = \frac{1}{2} * m * v^2 \tag{13}$$

**Trabajo mecánico (J)**

$$W = F * d \tag{14}$$

$$f = m * \left(\frac{2d}{t^2}\right) \tag{15}$$

Donde:

d: Longitud del dispositivo.

t: Tiempo de presión aplicada al dispositivo.

m: Peso

F: Fuerza ejercida en el dispositivo.

### Área de acción del disco piezoeléctrico

El área efectiva de acción de un disco piezoeléctrico se refiere a la superficie efectiva del disco que está disponible para la transducción de energía. La ecuación 16 permite el cálculo de la medición directa de la carga eléctrica generada en respuesta a una fuerza mecánica conocida.

$$A = \frac{(\text{Área del cerámico}^2 AC)(\pi)}{4} \quad (16)$$

Donde:

A: Área efectiva de acción del disco.

$\pi$ : 3.1416 Constante.

AC: área total del cerámico en  $m^2$ .

### Parámetros físicos de la cerámica piezoeléctrica

Se confirmaron las propiedades físicas de la muestra mediante el análisis de los parámetros físicos de la lámina piezoeléctrica, incluyendo el peso específico ( $N/m^3$ ), la resistencia ( $\Omega$ ), la conductividad (S/m) y el estudio de trabajo mecánico (J).

- Peso específico ( $gr/cm^3$ ):

$$Pe = \frac{f}{v} = \frac{m \cdot g}{v} = \rho \cdot g \quad (17)$$

En la ecuación 17 sustituyendo el peso específico se obtuvo como resultado  $1062.75 N/m^3$ .

Resistencia de un material (cobre) es de  $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

La resistencia eléctrica da como resultado  $1.29 \times 10^{-4} \Omega$ .

Conductividad eléctrica (S/m) se calculó utilizando la respectiva fórmula y se obtuvo como resultado  $59.52 M \cdot S/m$

$$\sigma = \frac{1}{p}$$

## 2.5 Cálculos y pruebas de los parámetros eléctricos y mecánicos

El cálculo y pruebas de los parámetros eléctricos y mecánicos son primordiales al momento de diseñar, fabricar y operar los sistemas mecánicos y eléctricos. Así también, con los valores obtenidos de los cálculos matemáticos previos, la única manera de comprobar los resultados es la medición de los valores en la práctica.

### 2.5.1 Cálculo de voltaje de generación

Con los fundamentos teóricos del apartado 2.4.1, se procedió a desarrollar los cálculos para obtener la tensión aplicada en cada piezoeléctrico, a partir de la Ecuación 7.

$$V = \left(-g_{33} * h * \frac{f}{A}\right) = -\left(g_{33} * h * \left(\frac{f}{d^2 * \frac{\pi}{4}}\right)\right) \quad (18)$$

**Tabla 1**

*Material piezoeléctrico características*

Formula	Datos	Valor
<b>g<sub>33</sub></b>	Constante piezoeléctrica. (Vm/N)	$25 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$
<b>H</b>	Largo o grueso del material piezoeléctrico(mm)	0.2mm
<b>F</b>	Impulso ejercido en el piezoeléctrico. (N)	784N
<b>D</b>	Diámetro efectivo del cerámico piezoeléctrico.	35mm

*Nota:* De acuerdo con los valores de la Tabla 1 procedemos a calcular la tensión que genera el piezoeléctrico al momento de ser aplicada una fuerza externa.

En la sección 2.1 se mencionan todos estos datos, los cuales se utilizan para dar forma a la Ecuación 6 y calcular la tensión generada en el disco piezoeléctrico, que resulta ser de 3.88 V.

### **2.5.2 Pruebas eléctricas en el elemento piezoeléctrico**

Para la elaboración del presente proyecto, se realizaron pruebas de los piezoeléctricos para evaluar y comparar características eléctricas, al momento de seleccionar los piezoeléctricos se tomó en cuenta el uso previsto del elemento y las especificaciones requeridas. Es así como se realizaron dos tipos de pruebas: Prueba de tensión generada por impulso directo y Prueba de corriente generada por impulso directo.

#### **Prueba de tensión generada por impulso directo**

Este tipo de prueba se realizó para evaluar características eléctricas del piezoeléctrico, la tensión que nos brinda es alrededor de 4 y 18 voltios. Para medir está tensión se usó un multímetro y para simular la deformación del piezoeléctrico la realizamos con la mano como muestra la figura 9.

**Figura 13**

*Prueba de tensión*

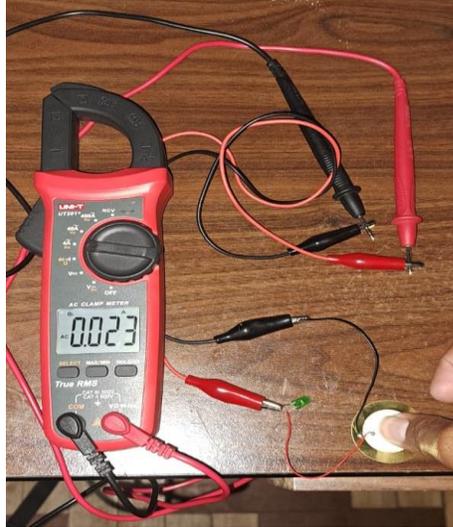


#### **Prueba de corriente generada por impulso directo**

La corriente generada por los piezos eléctricos es de 22 mA, este valor se lo obtuvo por las pruebas realizadas con un multímetro y una fuerza mecánica aplicada como se observa en la Figura 14.

## Figura 14

*Prueba de corriente generada por impulso directo*



En cualquier caso, es importante realizar pruebas experimentales para evaluar las características eléctricas de los elementos piezoeléctricos en condiciones reales y tomar en cuenta todos los factores que puedan afectar su rendimiento. De esta manera, se pueden identificar las limitaciones y las posibilidades de aplicación de estos elementos en diferentes situaciones y desarrollar soluciones que mejoren su desempeño en las condiciones específicas de cada caso.

### 2.6 Diseño del generador Piezoeléctrico

El diseño del generador piezoeléctrico implica una selección de materiales, geometría y modo de operación para la obtención de una alta eficiencia de la energía sus partes principales son: piezoeléctricos, sistema de generación, sistema de almacenamiento.

#### 2.6.1 Software utilizados

Para lograr diseñar el generador, tomo en cuenta que existen muchos softwares para el diseño y prototipado, así lograr detallar el desarrollo y explicación del modelado. Cabe recalcar que ciertos softwares para uso ingenieril funcionan con licencia o compra de permiso y otros

tienen licencias con cuenta libre o estudiantil, por tanto, para lograr el objetivo de nuestro trabajo utilizare software con funciones y herramientas especiales para nuestro generador, posteriormente detallare cada software utilizado.

### **2.6.2 Software SolidWorks**

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD) utilizado en ingeniería y diseños mecánicos, permitiendo al usuario crear modelos en 3D de piezas y su ensamble mecánico, lo que representa el producto final de forma real e identifica el problema en los diseños o estructuras en ocasiones. Otra de sus partes esenciales es la simulación virtual de los prototipos, ver su rendimiento y funcionamiento.

Algunas de las características son: herramienta de creación de dibujos técnicos, capacidad de análisis de esfuerzos y fatiga, interfaz intuitiva y fácil de usar. Es por esto por lo que es ampliamente utilizado en la industria de la ingeniería y el diseño mecánico, siendo uno de los softwares líderes del campo.

### **2.6.3 Software Proteus 8**

Es un software que nos permite diseñar circuitos electrónicos y simular sistemas embebidos, utilizado en la industria para el diseño, verificación y fabricación de PCB.

Proteus 8 Profesional proporciona de un entorno integrado de diseño y simulación, que permite a los usuarios diseñar crear y probar circuitos de una manera eficiente. Sus características son: Editor de esquemas, Editor de PCB, Simulación, Biblioteca de componentes, Visualización de resultados.

### **2.6.4 Software Arduino**

El IDE de Arduino es una herramienta esencial para programar placas de Arduino y es ampliamente utilizado para la parte de electrónica y programación, debido a su facilidad de uso y

versatilidad. Debido a que tiene varias funciones didácticas mientras se lo usa como edición de códigos, compilación de códigos, monitor serie.

## 2.7 Diseño de la estructura para los piezoeléctricos

En esta parte el diseño de la estructura para los piezoeléctricos es un aspecto importante, para maximizar su rendimiento y durabilidad, así cumpliendo todos los parámetros requeridos para la implementación del generador y sea muy eficiente.

### 2.7.1 Selección del material

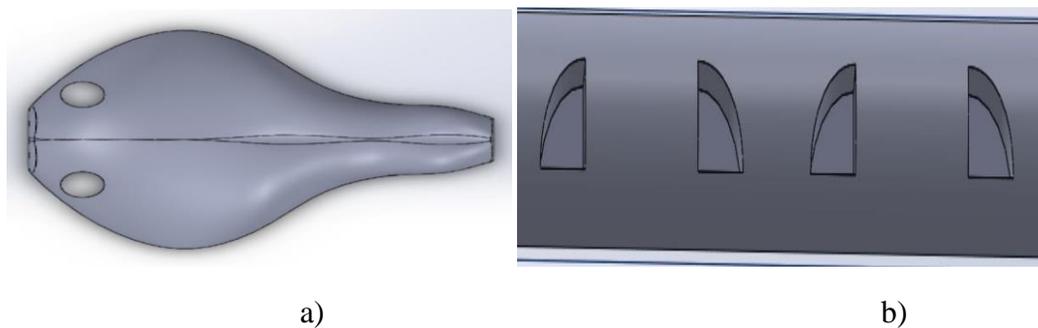
Es importante seleccionar un material que tenga una alta rigidez y baja densidad para minimizar la masa total del sistema. También es fundamental considerar la compatibilidad del material con el dispositivo piezoeléctrico para evitar problemas de unión y deformaciones.

### 2.7.2 Diseño del soporte

La estructura debe proporcionar un soporte adecuado para el dispositivo piezoeléctrico, permitiendo su fijación y asegurando que se mantenga en su lugar durante la operación. El soporte debe ser rígido y resistente como observamos en la Figura 15.

## Figura 15

*Diseño de los piezoeléctricos*



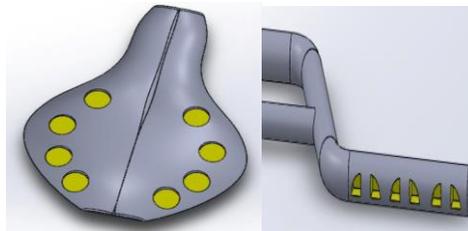
*Nota:* De acuerdo con la figura 15, a) podemos ver el diseño de la base del sillín donde se colocarán los piezoeléctricos. b) podemos ver el diseño de la base del manillar donde se colocarán los piezoeléctricos.

### 2.7.3 Diseño de la geometría

La geometría de la estructura debe ser optimizada para la aplicación específica del dispositivo piezoeléctrico. Esto incluye la forma y tamaño del soporte, la ubicación del dispositivo piezoeléctrico y la disposición de los componentes adicionales, como los electrodos y los materiales amortiguadores.

#### Figura 16

*Trazado de las guías para los piezoeléctricos*



a)

b)

*Nota:* En la figura 16 a) y b), se puede apreciar el posicionamiento de los piezoeléctricos en el sillín y el manillar, junto con las dimensiones específicas requeridas para el material y las instrucciones de cableado de conexión.

### 2.7.4 Diseño de los electrodos

Los electrodos deben ser diseñados para proporcionar un contacto adecuado con el dispositivo piezoeléctrico, asegurando una transmisión eficiente de la señal eléctrica. También se debe considerar la forma y el tamaño de los electrodos para evitar la interferencia con otros componentes y la deformación del dispositivo.

### 2.7.5 Diseño de la amortiguación

Se deben incluir materiales amortiguadores para reducir la transmisión de vibraciones no deseadas y prevenir la fractura del dispositivo piezoeléctrico debido a impactos o cargas mecánicas.

### 2.7.6 Diseño de la carcasa

La carcasa debe ser diseñada para proteger el dispositivo piezoeléctrico de factores ambientales como la humedad, la temperatura y la suciedad, además de proporcionar un medio de conexión para los electrodos.

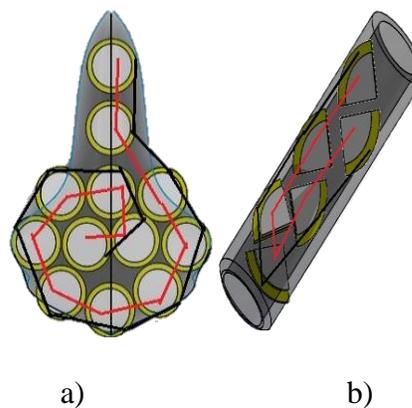
#### Interconexión de elementos

En este caso, la conexión de los elementos piezoeléctricos es uno de los principales factores que puede provocar averías y fallos en los propios elementos piezoeléctricos. La carga mecánica aplicada a los discos piezoeléctricos puede causar problemas significativos cuando se concentra en un punto específico, como una intersección o una interconexión de elementos piezoeléctricos.

Después de descubrir este problema, se decidió utilizar un tipo de conexión en paralelo como se muestra en la figura 17 a) y b). En esta configuración, cada piezoeléctrico se coloca en paralelo con un diodo Schottky (o un puente de diodos) de manera que, si alguno de los elementos genera un voltaje negativo, no fluirá corriente a través del diodo.

#### Figura 17

*Conexión en paralelo del Sillín y Manillar*



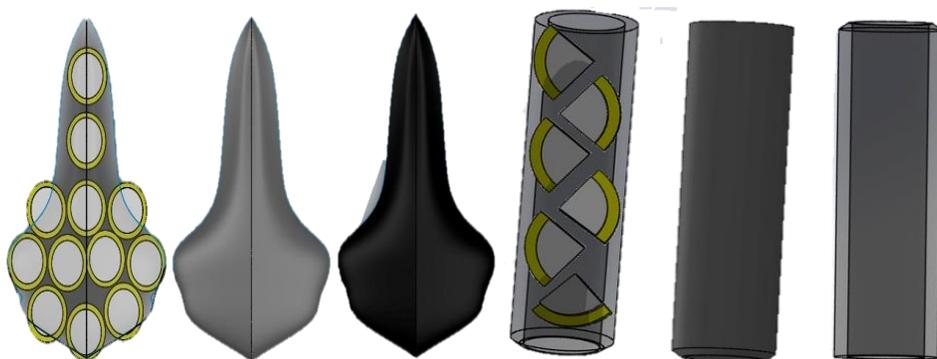
*Nota:* en la figura 17 a) y b), se muestra la conexión de los discos piezoeléctricos que ya han sido ensamblados en el dispositivo, listos para ser puesto en funcionamiento.

## 2.8 Diseño 3d de las partes de la estructura

El diseño de la estructura de la base donde se instalará los piezoeléctricos, tanto sillín y manillar como se observa en la figura 18, contará con un número de piezoeléctricos, 48 piezoeléctricos en el sillín y 12 piezoeléctricos en el manillar. Así también un aspecto muy importante es el sistema de transmisión y almacenamiento que se encuentra bajo el sillín de la bicicleta. Y al final de las imágenes podemos ver la cubierta que tendrá nuestros piezoeléctricos para resguardarlas.

### Figura 18

*Modelado 3D, Sillín y Manillar de la bicicleta*



*Nota:* Mediante el modelado 3D, podemos observar las dimensiones de nuestra estructura. En la primera imagen, se muestra la base con las perforaciones diseñadas específicamente para colocar los piezoeléctricos. En la segunda imagen, se aprecia cómo los piezoeléctricos están dispuestos y conectados entre sí. Por último, en la tercera imagen, se presenta un modelo de la cubierta que protegerá los piezoeléctricos, evitando así posibles daños o fallas.

## 2.9 Diseño del sistema electrónico para transmitir y almacenar la energía eléctrica

El diseño del sistema electrónico para transmitir y almacenar la energía generada por los piezoeléctricos es parte del proceso en la cual se debe cumplir y considerar aspectos como:

### 2.9.1 Rectificación y acondicionamiento de la señal

La señal eléctrica generada por los dispositivos piezoeléctricos es una señal de corriente alterna (AC), que debe ser rectificadora y acondicionada para su uso en aplicaciones prácticas. Esto se puede lograr mediante el uso de diodos rectificadores y filtros para eliminar los componentes no deseados de la señal.

#### **2.9.1.1 Amplificación de la señal**

Dependiendo de la aplicación específica, es posible que se requiera amplificar la señal eléctrica generada por los dispositivos piezoeléctricos para aumentar la potencia de salida. Esto se puede lograr mediante el uso de amplificadores de potencia adecuados.

#### **2.9.1.2 Conversión de voltaje**

La energía eléctrica generada por los dispositivos piezoeléctricos puede tener voltajes variables, lo que puede afectar su uso en aplicaciones prácticas. Por lo tanto, es importante incluir circuitos de conversión de voltaje para ajustar el voltaje de la señal a los niveles necesarios para la aplicación específica.

#### **2.9.1.3 Almacenamiento de energía**

Para maximizar la eficiencia en la utilización de la energía generada por dispositivos piezoeléctricos, es fundamental contar con sistemas de almacenamiento adecuados, como baterías o capacitores, que sean capaces de gestionar niveles de voltaje y corriente apropiados. Además, es crucial seleccionar componentes con una alta eficiencia tanto en la carga como en la descarga.

#### **2.9.1.4 Monitoreo y control**

Para garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema, es importante incluir circuitos de monitoreo y control que puedan supervisar los niveles de voltaje, corriente y temperatura del sistema. Esto puede ayudar a prevenir daños a los componentes y garantizar una operación óptima del sistema.

### 2.9.2 Descripción de elementos utilizados

El generador piezoeléctrico para su funcionamiento requiere de ciertos materiales electrónicos, como se muestra en la Tabla 1 que permitan su conexión a un circuito y su uso adecuado. Los cálculos utilizados para dimensionar las resistencias del circuito se basan en:

Para los valores especificados en los estándares del proyecto, se considera una tensión de 12 voltios, la carga indicada para las luces es de 12 watt alimentadas a 12V y  $\beta = 30$ .

Para el cálculo de la corriente del colector, partiremos de la Ecuación 7

$$P = (V) * (I)$$

Despejando la formula anterior, obtendremos la corriente del colector de acuerdo con la Ecuación 19.

$$I = I_c = \frac{P}{V} \quad (19)$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación 18, se obtiene como resultado una corriente de 1A.

Para garantizar la saturación del transistor, utilizaremos el parámetro  $\beta$  (beta) más bajo. Utilizando la Ecuación 20, podemos calcular la corriente en la base del transistor, que resulta ser de 0.33 A.

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad (20)$$

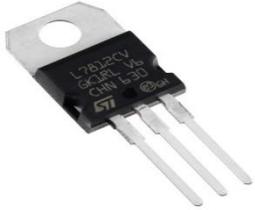
Posterior a esto procedemos a calcular la resistencia que la obtendremos de la Ecuación 21.

$$12V = R_b * I_b - V_{bc} \quad (21)$$

Al despejar  $R_b$  de la Ecuación 21 y sustituir los valores correspondientes, obtenemos el valor de la resistencia en la base de 240  $\Omega$ . Es así que el resistor del colector limita el paso de corriente al circuito.

**Tabla 2***Lista de materiales para el generador piezoeléctrico*

Dispositivo	Apariencia	Información
Dispositivo Piezoeléctrico Titanato-Zirconato de Plomo (PZT)		<p>*Disco cerámico piezoeléctrico 35mm</p> <p>*Ref. DH35.453/35</p> <p>*Diámetro (<math>d</math>) <math>\varnothing</math> 35 mm</p> <p>*Espesor (<math>t</math>) 1 mm</p> <p>*Frecuencia de resonancia 2'3 kHz</p> <p>*Impedancia (resonancia) 300 O</p> <p>*Capacidad (a 1kHz) 25.000 pF</p> <p>*Constante de carga piezoeléctrica</p> <p><math>d_{33} 460 \times 10^{-12} \frac{m^2}{N}</math></p> <p>*Constante de tensión piezoeléctrica <math>g_{33} 2 \times 10^{-3} \frac{Vm}{N}</math></p> <p>*Constante dieléctrica relativa <math>\epsilon^T = 1850</math></p>
Diodo Rectificador 1N4004		<p>Maneja una corriente máxima de 1 amperio y una tensión máxima de 400 voltios. Los pines del puente de diodos están etiquetados como V+ y V-, que corresponden a la entrada de corriente alterna (AC), y +V y -V, que corresponden a la salida de corriente continua (DC).</p>
		El capacitador electrolítico puede almacenar una

<p>Capacitador Electrolítico</p>		<p>carga de hasta 1000microfaradios y soporta un voltaje máximo de 25 voltios.</p>
<p>Regulador LM7812</p>		<p>El regulador de voltaje LM7812 es una fuente de alimentación regulada de 12 voltios, con 3 pines: Pin de entrada (Vin), Pin de salida (V out) y Pin de tierra (GND).</p>
<p>Resistencia</p>		<p>La resistencia es utilizada para limitar la corriente o tensión en una parte del circuito. Con una tolerancia del 5% o 10% con respecto al valor nominal.</p>
<p>Final de carrera tipo pulsador</p>		<p>El final de carrera tipo pulsador generalmente tiene dos posiciones: Abierto y Cerrado. En la posición normal, los contactos están abiertos, interrumpiendo el flujo de corriente eléctrica. Al presionar el pulsador, los contactos se cierran, permitiendo que la corriente fluya a través del interruptor.</p>
<p>Interruptor de 2 Posiciones</p>		<p>El interruptor de 2 posiciones: posición central (apagado o encendido),(encendido) o (apagado), todo esto realiza el trabajo de interrumpir el flujo de la corriente y apaga cualquier dispositivo conectado al mismo.</p>

<p>Batería Litio</p>		<p>Las baterías de Li-ion requieren un circuito de protección para evitar sobrecargas y descargas excesivas. Soportan un voltaje de 3.7 v y 2000 mAh.</p>
--------------------------	---	---

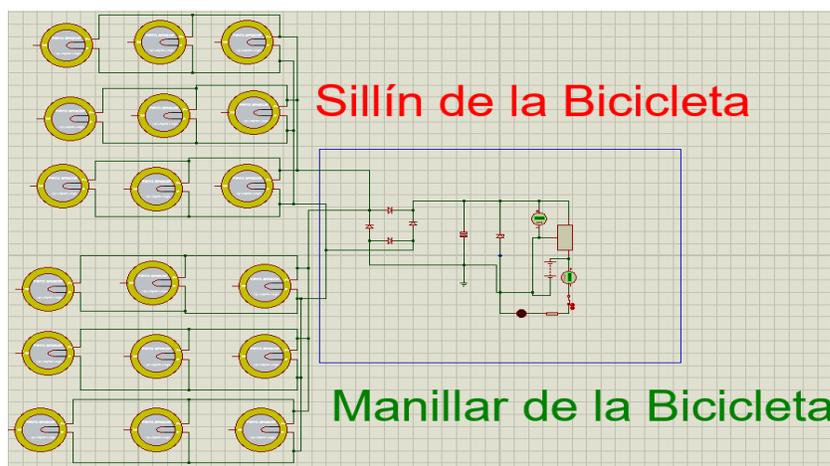
Es importante seleccionar los materiales y componentes adecuados para el circuito como los de la Tabla 2, tomando en cuenta los valores de tensión y corriente a trabajar, así también aspectos como frecuencia de operación, temperatura del ambiente. Para lograr un correcto funcionamiento y prevenir riesgos a futuro.

### 2.9.3 Conexión del circuito

En la figura 19, podemos observar el sistema de transmisión y almacenamiento de energía obtenida por el generador piezoeléctrico.

**Figura 19**

*Circuito electrónico del sistema de transmisión y almacenamiento, conectados en paralelo para el sillín y manillar con los piezoeléctricos.*



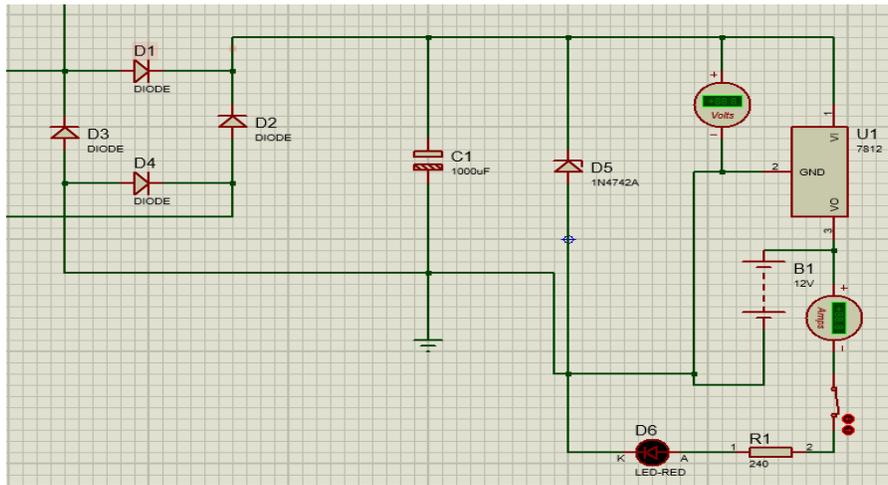
*Nota:* De acuerdo con la figura 19 observamos el diseño del circuito de rectificación y almacenamiento, compuesta para el sillín de 50 piezoeléctricos conectados en paralelo y para el

manillar 12 piezoeléctricos conectados en paralelo. Todo este circuito recibe la energía generada de los dos sistemas separados, para ser almacenada en las 3 baterías de 3.7 V.

En la Figura 20, se muestra el circuito eléctrico de rectificación y almacenamiento del sistema, ampliada para poder apreciar de mejor manera la conexión de elementos.

### Figura 20

*Circuito electrónico de transmisión y sistema de almacenamiento*



En la Figura 20, se describe el sistema de rectificación y almacenamiento, que está compuesta por el puente de diodos utilizado para convertir la señal de voltaje alterna(AC) en voltaje directo(DC), con una configuración específica para permitir que la corriente fluya en una sola dirección, después de pasar por el puente de diodos, la señal puede tener fluctuaciones o rizados, por eso es necesario utilizar un capacitor electrolítico de 1000 µF con una capacidad de 25V y cuando el voltaje supera el valor del diodo comienza a conducir y la mantiene constante, además el diodo Zener proviene el retorno de carga al sistema y que la corriente circule en una sola dirección.

## CAPITULO 3

### Implementación del generador piezoeléctrico

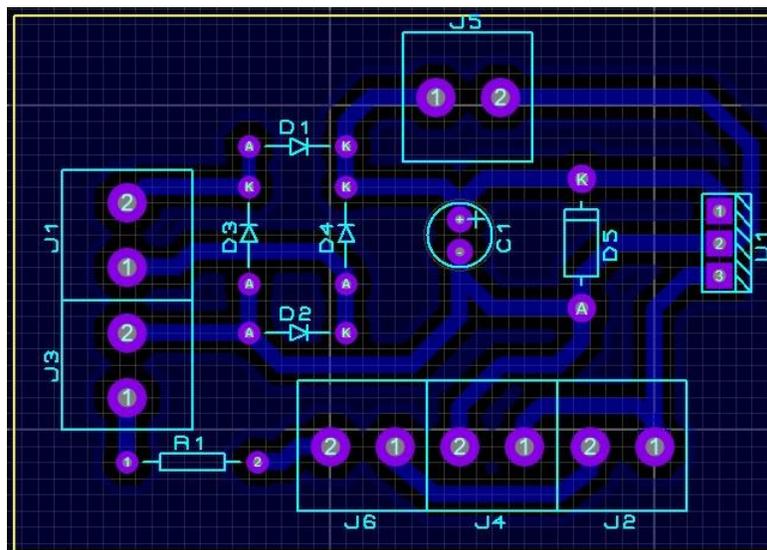
En este capítulo se detalla la construcción, implementación y pruebas de funcionamiento del prototipo de generador piezoeléctrico utilizando componentes seleccionados en el segundo capítulo. Además, se llevará a cabo la adquisición de datos durante el funcionamiento del dispositivo, utilizando el software Arduino IDE. Se presentarán las pruebas experimentales y ajustes necesarios para observar los resultados y evaluar el desempeño de los discos piezoeléctricos, para lograr un funcionamiento correcto y adecuado del prototipo.

#### 3.1 Conexión del PCB del circuito

Para realizar las conexiones se toma en cuenta toda la información obtenida de las fichas de datos de cada dispositivo electrónico utilizado. El diseño del circuito se llevó a cabo utilizando Proteus 8 Professional, y el enrutado del circuito electrónico se realizó utilizando la herramienta de diseño de PCB (Printed Circuit Board) del mismo software. En la Figura 21 se muestra el ruteado del dispositivo realizado en el software.

**Figura 21**

*PCB del sistema de rectificación, filtrado y almacenamiento de energía*



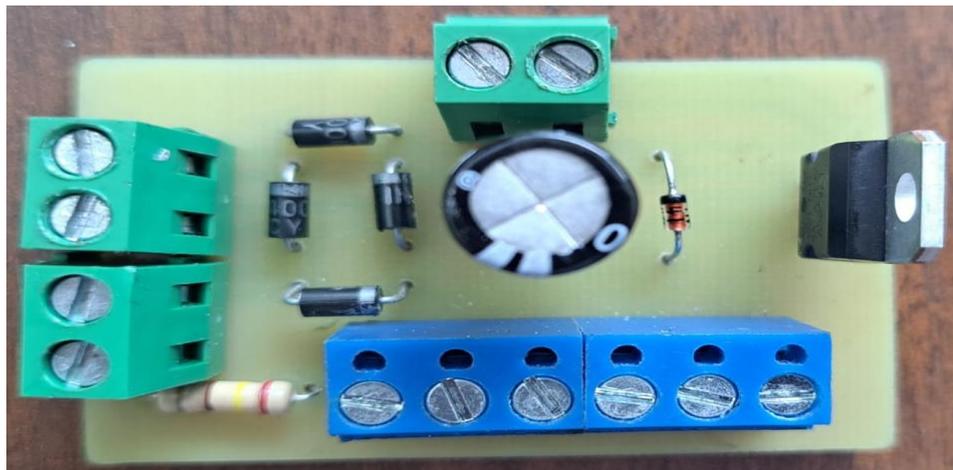
Una vez obtenido el diseño del PCB, se procede a transferirlo a una placa de baquelita mediante el uso de la impresión a laser y quemado. Esta técnica permite imprimir el circuito en la placa de manera precisa y eficiente. Posteriormente, se realizan las perforaciones en la placa utilizando una broca de 1 mm, como parte del proceso de preparación final de la placa.

### 3.2 Montaje del sistema con los dispositivos de rectificación y almacenamiento

El montaje de los dispositivos del sistema de rectificación, adquisición, filtrado y almacenamiento se realiza considerando que los componentes electrónicos se acoplan en una caja hermética con certificación norma y RETIE, que tiene dimensiones de 242x402 mm. La distribución del espacio para los componentes se realiza de acuerdo con lo indicado en la Figura 22, la cual proporciona las instrucciones y recomendaciones necesarias para colocar cada dispositivo en su posición correspondiente dentro de la caja.

**Figura 22**

*Circuito Físico del generador*



Al lado izquierdo se encuentra las 2 borneras de entrada de voltaje generada por los piezoeléctricos tanto del sillín y manillar de la bicicleta. A continuación, pasara a la etapa de rectificación hasta llegar a la tercera bornera, que se encarga de obtener la señal de los datos

recopilados. Toda esta señal se filtra, se rectifica y finalmente se dirige a la cuarta bornera, que se encarga de alimentar a la batería de la energía generada.

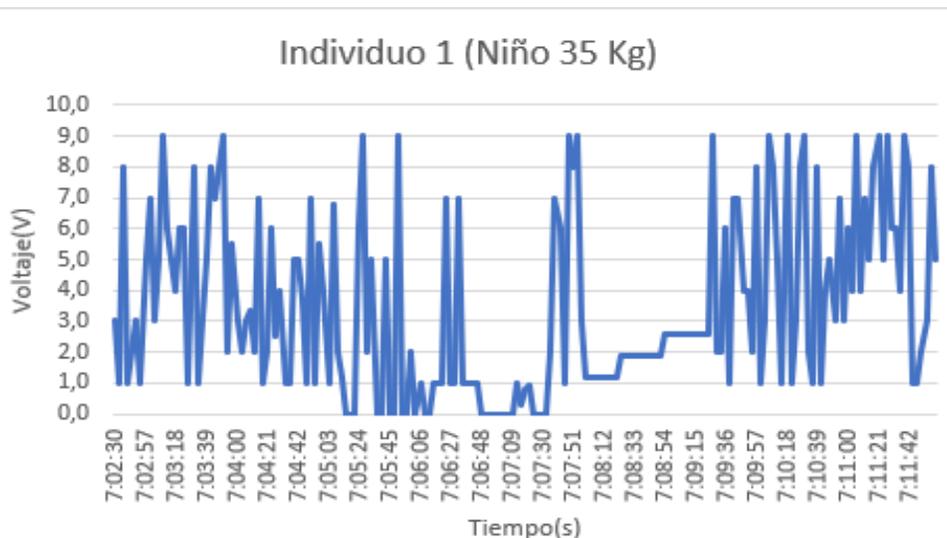
### 3.2 Adquisición de datos de voltaje

Para recopilar los datos, se utilizó un software IDE Arduino con programación específica que nos permite detectar y medir los pulsos de voltaje generados al utilizar la bicicleta. Estos pulsos de voltaje son el resultado de la deformación de los elementos piezoeléctricos integrados en el sillín y el manillar de la bicicleta. El propósito principal de esta medición es generar energía a partir de estos pulsos para su posterior almacenamiento.

A continuación, en las Figuras 23, 24 y 25 se pueden apreciar los pulsos de voltaje generados por cada una de las personas que participaron en la prueba. Estas figuras muestran de manera visual los resultados obtenidos, permitiendo observar la forma y la amplitud de los pulsos generados por los elementos piezoeléctricos del sillín y el manillar de la bicicleta. Estos datos son importantes para evaluar y analizar el rendimiento de la generación de energía a partir de estos pulsos

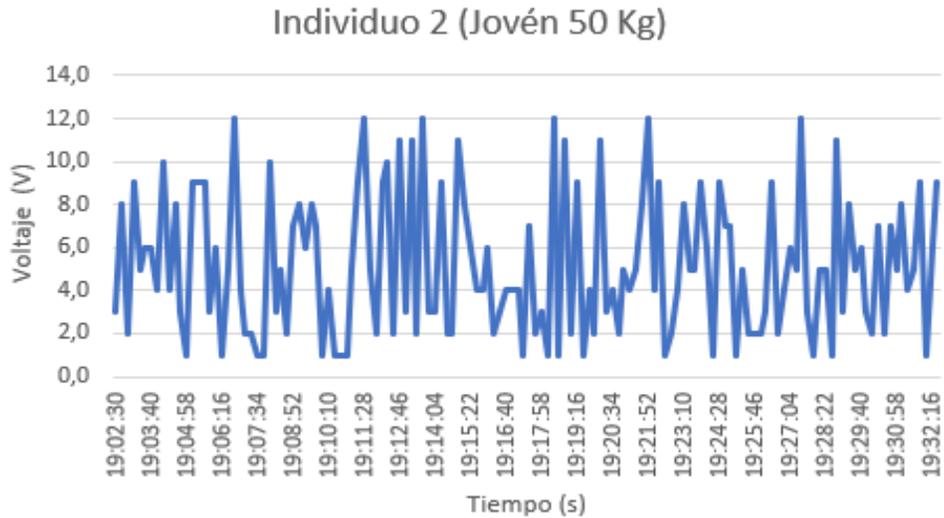
**Figura 23**

*Datos de voltaje contra el tiempo individuo 1*



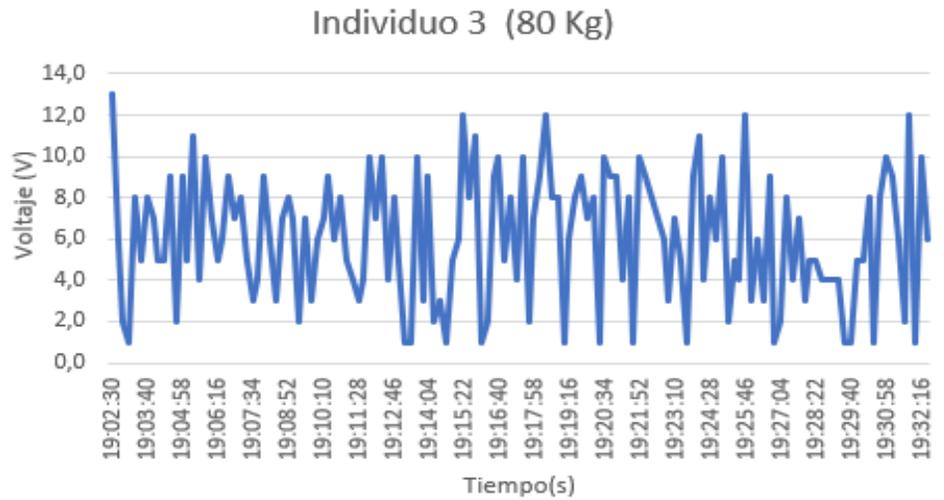
**Figura 24**

*Datos de voltaje contra el tiempo individuo 2*



**Figura 25**

*Datos de voltaje contra el tiempo individuo 3*



### 3.2.1 Parámetros físicos del sillín y manillar de la bicicleta

En la Tabla 3, se presentan los datos utilizados para el cálculo de la fuerza, así como el trabajo mecánico producido por cada individuo de prueba. Estos datos son fundamentales para analizar y comprender la relación entre la fuerza ejercida y la cantidad de trabajo mecánico

generado durante el peso de cada persona. La tabla 3 proporciona una representación clara y organizada de los valores recopilados, lo que facilita el análisis comparativo y la evaluación de los resultados obtenidos. Estos datos son valiosos para medir el rendimiento y la eficiencia del dispositivo, y proporcionan información importante para futuras mejoras y optimizaciones del diseño.

**Tabla 3**

*Datos de cada individuo para el cálculo del trabajo*

Datos	Individuo 1	Individuo2	Individuo 3
Masa(Kg)	35	50	80
t(s)	1,1	1,5	1,7
F(N)	33,21	26,67	34,71
d(m)	0,6	0,6	0,6
W(J)	20	16	20,82

También se evaluaron las características del diseño mecánico mediante el uso del generador piezoeléctrico para obtener la transducción (W), rectificación (Watts), acondicionamiento (V) y almacenamiento (V) de la energía generada.

En la etapa de transducción (W), se aprovechó el efecto piezoeléctrico del sillín y manillar de la bicicleta, que convierte la fuente mecánica del rozamiento y presión de las personas en energía eléctrica renovable.

Posteriormente, en la etapa de rectificación (Watts), la energía eléctrica generada fue convertida de corriente alterna a corriente continua para su uso eficiente.

En la etapa de acondicionamiento (V), la energía fue adecuada mediante el uso de un diodo rectificador, lo que permitió obtener un voltaje constante y una señal óptima.

Finalmente, en la etapa de almacenamiento (V), se proporcionó un nivel de tensión adecuado para almacenar la energía generada en una batería de 12v, permitiendo su posterior uso o disponibilidad.

Este enfoque de diseño mecánico y las etapas de transducción, rectificación, acondicionamiento y almacenamiento son fundamentales para maximizar la eficiencia y aprovechamiento de la energía generada por el generador piezoeléctrico.

### **3.2.2 Potencia mecánica y energía eléctrica generada**

Además, se realizó la captura de datos mediante la identificación de la potencia mecánica y la energía eléctrica generada para su posterior almacenamiento. Se obtuvo la cantidad de energía generada (kW/h) a través del generador piezoeléctrico. También se verificó la energía mecánica (J) mediante el movimiento de la persona al desplazarse en la bicicleta. Para el almacenamiento de la energía eléctrica, se utilizó un dispositivo que consiste en una batería (A).

Este enfoque permitió recopilar y cuantificar la potencia mecánica generada por el movimiento de las personas y transformarla en energía eléctrica utilizable. La capacidad de almacenamiento en la batería asegura que la energía generada no se desperdicie y esté disponible para su uso posterior, proporcionando una solución eficiente y sostenible para la generación y almacenamiento de energía a través de la tecnología piezoeléctrica.

### **3.2.3 Energía mecánica (Em)**

La energía mecánica de un cuerpo se define como la suma de su energía cinética y su energía potencial. Utilizando los datos previamente obtenidos, vamos a calcular la constante elástica K utilizando el peso del individuo de prueba más alto.

Mediante las ecuaciones 11, 12 y 13, y realizando los cálculos correspondientes, encontramos el valor individual. Luego, estos valores se sustituyeron en la ecuación 10. Todos estos datos y los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 4.

Recuerda que la Tabla 4 contendrá los valores calculados de la constante elástica K y otros datos relevantes relacionados con la energía mecánica del cuerpo en estudio. Es importante tener en cuenta que los cálculos y los resultados pueden variar dependiendo de los datos específicos y las ecuaciones utilizadas en el análisis

**Tabla 4**

*Datos específicos de los individuos para el cálculo de la energía mecánica*

Datos Específicos	Individuo 1	Individuo 2	Individuo 3
Masa (Kg)	35	50	80
Velocidad (m/s)	0,54	0,40	0,35
X (m)	0.0022	0.0018	0.0011
g(m/s <sup>2</sup> )	9.8	9.8	9.8
h (m)	0,010	0,010	0,010
Energía potencial elástica (EPE)	0.000276	0.000264	0.000158
Energía potencial gravitatoria(EPG)	3,43	4,9	7,84
Energía cinética (EC)	5,10	4	4,9
Energía Mecánica (EM)	<b>8,53</b>	<b>8,90</b>	<b>12,74</b>

### 3.2.4 Energía total generada

La cantidad de energía generada por el generador piezoeléctrico se puede calcular utilizando la fórmula:

$$\text{Energía generada (kWh)} = \text{Potencia} \times \text{Tiempo}$$

En base a los datos de la tabla anterior se procedió a calcular la corriente y la potencia generada con cada uno de los pesos aplicados obteniendo los siguientes resultados representados en la Tabla 5,Tabla 6,Tabla 7.

**Tabla 5***Cálculo de la energía generada primer individuo (18,41 J)*

Datos	Valores	Corriente(A)	Potencia(w)	Generación de energía		
				Medida 1	Medida 2	Medida 3
Voltaje 1	6,70					
Resistencia	240					
Kilovatio	1000	0,027	0,180	<b>180</b>		
Voltaje 2	5,90					
Resistencia	240					
Kilovatio	1000	0,024	0,141		<b>141</b>	
Voltaje 3	4,9					
Resistencia	240					
Kilovatio	1000	0,020	0,098			<b>98</b>

**Tabla 6***Cálculo de la energía generada Segundo individuo (8,90 J)*

Datos	Valores	Corriente(A)	Potencia(w)	Generación de energía		
				Medida 1	Medida 2	Medida 3
Voltaje 1	7,9					
Resistencia	240					
Kilovatio	1000	0,032	0,098	<b>252</b>		
Voltaje 2	7,1					
Resistencia	240					
Kilovatio	1000	0,029	0,205		<b>205</b>	

Kilovatio	1000			
Voltaje 3	5,4			
Resistencia	240			
		0,022	0,118	<b>118</b>
Kilovatio	1000			

**Tabla 7**

*Cálculo de la energía generada Tercer individuo (12,74 J)*

Datos	Valores	Corriente(A)	Potencia(w)	Generación de energía		
				Medida 1	Medida 2	Medida 3
Voltaje 1	8					
Resistencia	240					
		0,033	0,264	<b>264</b>		
Kilovatio	1000					
Voltaje 2	8,3					
Resistencia	240					
		0,034	0,282		<b>282</b>	
Kilovatio	1000					
Voltaje 3	8,6					
Resistencia	240					
		0,035	0,301			<b>301</b>
Kilovatio	1000					

### 3.3 Almacenamiento de energía generada en la batería

Las baterías de litio tienen la capacidad de almacenar energía generada de 12 Voltios a 1,7 amperios.

De acuerdo con la información de la Tabla 8, la batería fue alimentada por diferentes fuentes de energía eléctrica. Para esto se utilizó el voltaje y la corriente generados. Para determinar el tiempo de carga que se necesitara para cargar la batería al 100%.

**Tabla 8**

*Tiempo de carga de la batería*

<b>Energía mecánica(J)</b>	<b>Medición 1(w)</b>	<b>Medición 2(w)</b>	<b>Medición 3(w)</b>	<b>Tiempo de carga 1(7wh)</b>	<b>Tiempo de carga 2(7wh)</b>	<b>Tiempo de carga 3(7wh)</b>
8,53	0,180	0,141	0,098	38,88	49,64	71,42
8,90	0,252	0,205	0,118	27,78	34,14	59,32
12,74	0,264	0,282	0,301	26,51	24,82	23,25

Según los datos proporcionados en la Tabla 8, se especifica la cantidad de energía mecánica producida por cada individuo durante las pruebas realizadas. Esta energía mecánica es el resultado del esfuerzo y la actividad física realizada por cada persona.

### **3.4 Análisis del uso de la bicicleta**

Dado que muchas personas utilizan la bicicleta de montaña como medio de transporte y para practicar deportes extremos, se realizó un conteo del uso de la bicicleta durante la semana en intervalos de tiempo específicos. Los intervalos de tiempo seleccionados fueron de 7 am a 9 am y de 7 pm a 9 pm, con una duración promedio de 240 minutos por jornada.

Durante estos intervalos de tiempo, se registró la cantidad de personas que utilizaron la bicicleta de montaña, incluyendo a niños, jóvenes y adultos. Estos horarios son populares debido a que muchas personas aprovechan las primeras horas de la mañana o las últimas horas de la tarde para realizar ejercicio físico o disfrutar de deportes extremos.

Por tanto, la construcción del prototipo Figura 26 están desarrollados en superficies rígidas en las cuales los piezoeléctricos están recubiertas por el tubo termo resistente para impedir el deterioro de los piezoeléctricos y que la energía solo fluya a través del conductor conectado.

**Figura 26**

*Bicicleta acoplada con los sensores piezoeléctricos y circuito*



Es fundamental considerar que los datos del conteo de personas pueden variar dependiendo de la ubicación geográfica y las características demográficas de la comunidad en la que se realizó el estudio. Además, este conteo sirve como una referencia para comprender las tendencias de uso de la bicicleta de montaña en diferentes momentos del día y de la semana, como se observa en la Tabla 9 brindando información valiosa sobre la popularidad y la demanda de este medio de transporte y deporte en la comunidad en cuestión.

**Tabla 9**

*Tabla de fracción horaria, días, minutos de uso de una bicicleta montañera*

Dia	Fracción horaria de uso	Minutos de uso
Lunes	7 am - 9 am, 7 pm - 9 pm	240

Martes	7 am - 9 am, 7 pm - 9 pm	240
Miércoles	7 am - 9 am, 7 pm - 9 pm	240
Jueves	7 am - 9 am, 7 pm - 9 pm	240
Viernes	7 am - 9 am, 7 pm - 9 pm	240
Sábado	7 am - 9 am, 7 pm - 9 pm	240
Domingo	7 am - 9 am	240

---

### **Método de análisis de los datos generados**

Los datos se recopilaban de manera cuantitativa utilizando instrumentos desarrollados en la plataforma de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. De igual manera se realizó un algoritmo que permitió visualizar la generación de energía eléctrica con la fuerza ejercida en el manillar y el peso que recibe el sillín de la bicicleta.

### **3.5 Aplicación de la energía almacena por parte del generador piezo eléctrico**

En esta parte se realizarán pruebas diferentes de 3 tipos ocasionando la estimulación de los piezoeléctricos para poder obtener energía con una vista amplia de carga y descarga de la energía generada.

Todas estas pruebas se refieren en cambiar la fuerza que es aplicada al sillín y manillar de la bicicleta para cargar el capacitor y poder obtener el tiempo que se demora para después tomar en cuenta los registros del tiempo en las que las luces led tardan en consumir la energía y así tener una vista del tiempo que la energía almacenada en los capacitores abastece a las luces led.

Los 3 tipos de prueba a realizar son:

#### **3.5.1 Ensayo 1: Niño (Factor demandante único de 35Kg)**

Si consideramos una persona con un peso de 35Kg concentrado, es considerablemente que genere suficiente fuerza como para deformar todos los piezoeléctricos que forman parte del sillín y con la fuerza de agarre deformara los piezoeléctricos del manillar de la bicicleta.

En la Figura 27 se muestra un niño ejerciendo fuerza en el sillín de la bicicleta por su peso y una fuerza de agarre en el manillar de la bicicleta provocando una deformación de los piezoeléctricos.

### Figura 27

*Ensayo 1: Factor deformante 35Kg*



En la figura 28 observamos el proceso de descarga. Por la luz led encendida y la descarga con el multímetro.

### Figura 28

*Descarga con factor deformante de 35 Kg*



Los valores obtenidos como resultado en la carga de un capacitor a una tensión de 6,79 volts se muestran en la tabla 10, del mismo modo los valores de descarga del capacitor por la luz led.

**Tabla 10**

*Resultados de la prueba : Factor deformante de 35 Kg*

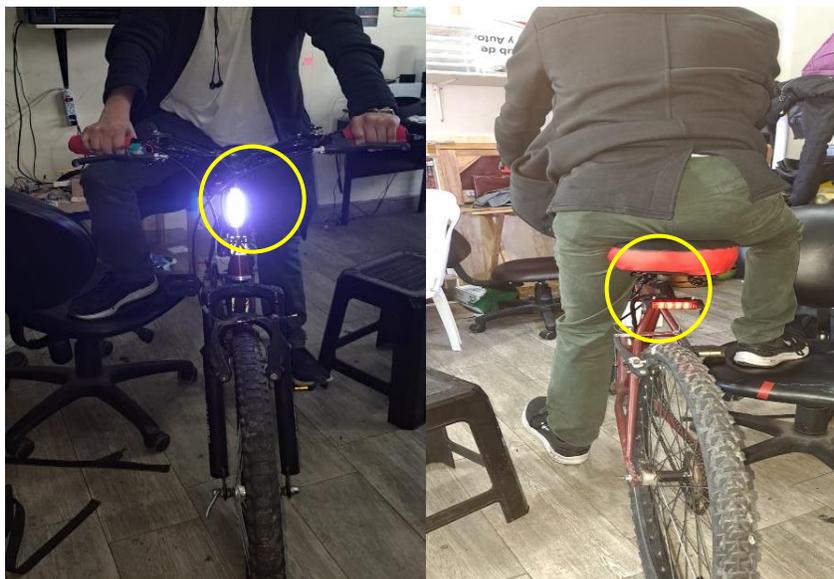
<b>Carga</b>		<b>Descarga</b>	
<b>Tensión [V]</b>	<b>Tiempo[s]</b>	<b>Tensión[V]</b>	<b>Tiempo[s]</b>
6,79	145,12	1,7	8.10

### **3.5.2 Ensayo 2: Joven**

En este segundo ensayo la fuerza a la que será sometido el generador piezoeléctrico tanto en el sillín y manillar de la bicicleta es de una persona con un de peso 50 kg, pero esta vez también aplicará fuerza en el sillín y manillar. Por lo tanto, en la Figura 29 se observa el área que cubre el peso de la persona y la fuerza de agarre que es sometida los piezoeléctricos.

**Figura 29**

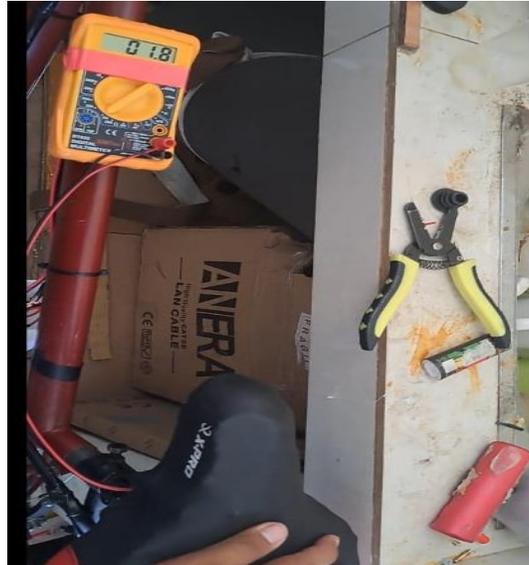
*Ensayo 2: Factor deformante 50Kg*



Del mismo modo para realizar la descarga del generador se realiza el método del ensayo 1. Todo esto tomando en cuenta el tiempo en que la luz led consume la energía del capacitor. En la Figura 30 podemos ilustrar el proceso de descarga.

**Figura 30**

*Descarga con factor deformante de 50Kg*



Los valores obtenidos como resultado en la carga de un capacitor a una tensión de 7,10 volts se muestran en la Tabla 11, del mismo modo los valores de descarga del capacitor por la luz led.

**Tabla 11**

*Resultados de la prueba 2 : Factor deformante de 50 Kg*

<b>Carga</b>		<b>Descarga</b>	
<b>Tensión [V]</b>	<b>Tiempo[s]</b>	<b>Tensión[V]</b>	<b>Tiempo[s]</b>
7,10	125,33	4,20	35,15

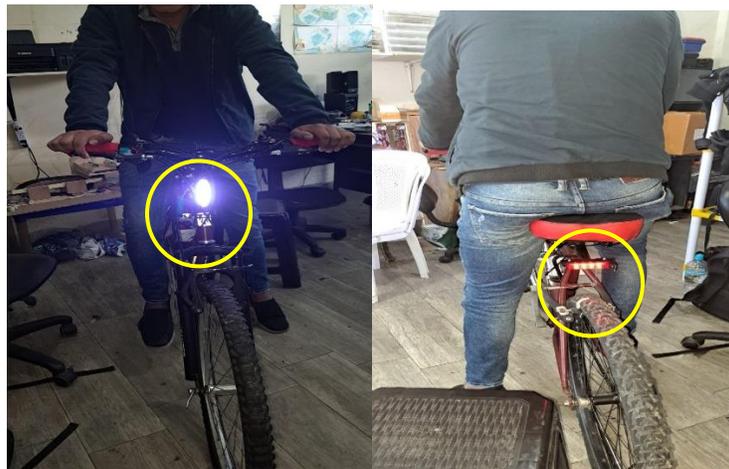
**3.5.3 Ensayo 3: Adulto**

En el ensayo 3 se utilizó una persona con un peso de 80kg para aplicar la fuerza y deformar los piezoeléctricos que están en el sillín y manillar de la bicicleta.

En la figura 31 se muestra una persona con un peso de 80Kg encargada de deformar los piezoeléctricos y cargar el capacitor.

### **Figura 31**

*Ensayo 3: Factor deformante 80Kg*



Del mismo modo para realizar la descarga del generador se realiza el método del ensayo 1 y 2. Todo esto tomando en cuenta el tiempo en que la luz led consume la energía del capacitor. En la Figura 32 podemos ilustrar el proceso de descarga.

### **Figura 32**

*Descarga con factor deformante de 80Kg*



Los valores obtenidos como resultado se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Resultados de la prueba 3 : Factor deformante de 80 Kg*

<b>Carga</b>		<b>Descarga</b>	
<b>Tensión [V]</b>	<b>Tiempo[s]</b>	<b>Tensión[V]</b>	<b>Tiempo[s]</b>
8,55	33,33	2	33,56

### **3.6 Análisis de resultados**

En resumen, los ensayos consistieron en demostrar la carga y almacenamiento de energía en un condensador utilizando tres factores de forma diferentes: 35 kg, 50 kg y 80 kg. Los resultados obtenidos en estos ensayos fueron analizados para mostrar el principio de generación de energía eléctrica a partir de la presión ejercida sobre la pieza. Esto evidencia el potencial de utilizar la electricidad generada de esta manera.

#### **Resultados de la generación de energía mecánica**

El objetivo del estudio fue determinar la cantidad de energía mecánica utilizada en el diseño del generador piezoeléctrico con el fin de generar energía eléctrica renovable. A continuación, en la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos:

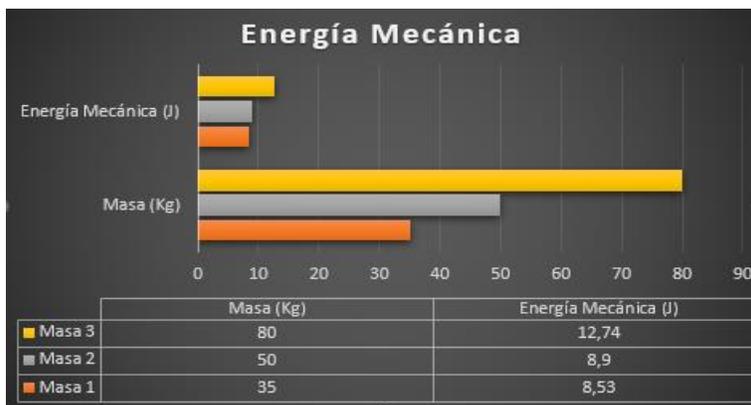
**Tabla 13**

*Energía mecánica generada*

Masa (Kg)	Energía	Energía Potencial	Energía Potencial	Energía Mecánica
	Cinética (J)	Elástica (J)	Gravitatoria(J)	(J)
35	5,10	0,000276	3,43	8,53
50	4	0,000264	4,9	8,90
80	4,9	0,000158	7,84	12,74

**Figura 33**

*Resultados de generación de energía mecánica*



De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 14 y figura 33 tenemos como resultado de la suma de las energías como energía potencial elástica , cinética y potencial gravitatoria por cada una de las masas de cada individuo. Los valores registrados como resultado fueron de 8,53 J, 8,9 J y 12,74 J.

**Resultados de la energía generada**

El objetivo del estudio fue identificar la cantidad de energía eléctrica renovable generada por el diseño del generador piezoeléctrica. A continuación, se muestra los resultados obtenidos:

**Tabla 14**

*Energía generada*

Energía Mecánica (J)	Generación de energía eléctrica (Wh)
	180
	141
8,53	98
	252

8,90	205
	118
	150
12,74	284
	301

La Tabla 14 muestra la cantidad de energía eléctrica generada por nuestro generador piezoeléctrico. Los valores están relacionados con la energía mecánica aplicada tanto en el sillín como en el manillar, y se presentan en diferentes rangos de energía.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Al aplicar 8,53 J de energía mecánica, el generador produjo una salida eléctrica de 98 Wh a 180 Wh., con 8,90 J de energía mecánica, se generó una salida eléctrica de 118 Wh a 252 Wh. Y al emplear 12,74 J de energía mecánica, se obtuvo una salida eléctrica de 150 Wh a 301 Wh.

### 3.7 Resultando del tiempo de carga

Los resultados muestran el tiempo requerido para cargar una batería utilizando la energía eléctrica generada.

#### Tabla 15

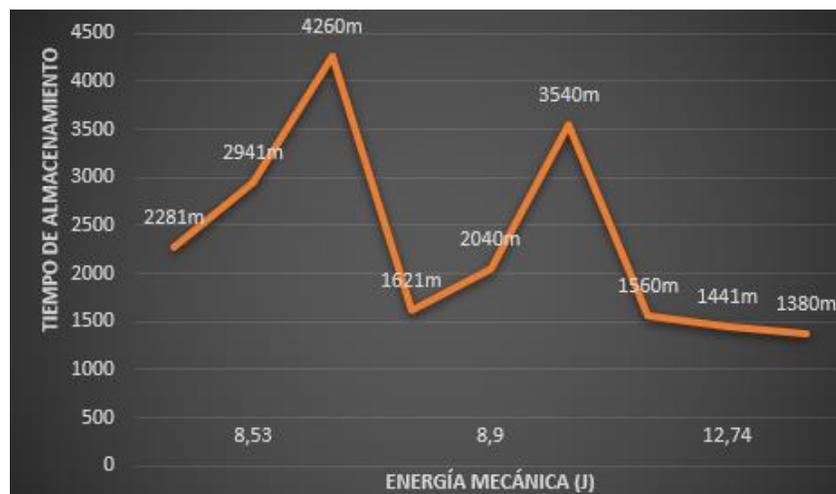
*Tiempo de carga de la batería con energía generada*

<b>Energía mecánica (J)</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>
	2281
8,53	2941
	4260
	1621

8,90	2040
	3540
	1560
12,74	1441
	1380

**Figura 34**

*Tiempo de almacenamiento*



De acuerdo con la tabla 15 y figura 34 muestra el tiempo de carga de una batería utilizando la energía mecánica generada durante el proceso. Para una energía mecánica de 8,53 J, el tiempo vario entre 2281 y 4260 minutos. En el caso de 8,9 J, el tiempo de carga fue de 1621 y 3520 minutos. Por último, con una energía mecánica de 12,74 J, el tiempo de carga abarco el rango de 1380 y 1560 minutos.

### 3.8 Discusión de resultados

El estudio propone el diseño de un generador piezoeléctrico que genere electricidad renovable a partir de la presión en el sillín y manillar de la bicicleta (energía Mecánica), lo que

nos ayuda a reducir el consumo de electricidad generada por fuentes cotidianas como combustibles fósiles, así reduciendo la contaminación ambiental, según (Burbano Barahona, 2021), propuso la implementación de un prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de una baldosa con elementos piezoeléctricos consiguiendo ahorrar costos energéticos, instalo una baldosa de  $40\text{cm}^2$  el cual genera energía eléctrica renovable basados en el desplazamiento o pisadas de los transeúntes. Es así como investigaciones posteriores llegaron a la conclusión de que el cuerpo humano se mantiene en constante movimiento generando energía mecánica que se la puede usar y convertir en energía eléctrica útil a través del efecto piezoeléctrico. Similar a lo mencionado por (Vargas, 2020) quien realizó el análisis y diseño experimental de las diferentes posibilidades de pisada estándar en las baldosas cuadrada y rectangular el cual consiste en simular la respuesta del sistema cuando se introduce una fuerza equivalente al paso de un peatón en esto tiene que ver el tipo de conexión y la forma de zancada al momento de caminar tomó en cuenta 3 casos dedos metatarso, media y talón considerando un peso de 40207 (N) ejercido exactamente en diferentes momentos de tiempo.

Con relación a la energía mecánica obtenida a partir de la masa de individuos (35kg a 80 kg) y en movimiento de la persona en su desplazamiento, se obtuvo valores de 8,53 a 12,74 Joule que fueron utilizados a fin de generar energía eléctrica renovable.

En el marco de la investigación, se llevó a cabo la implementación y diseño de un generador piezoeléctrico destinado a alimentar las luces delanteras y traseras de una bicicleta de montaña. Para ello, se empleó la base de montura específica de una bicicleta de este tipo. En dicha base, se dispusieron 50 discos piezoeléctricos de idénticas características de manera simétrica, los cuales fueron recubiertos con una capa de caucho en su interior. Adicionalmente, se colocaron 50 anillos de caucho rígido sobre estos discos, con el propósito de generar vibraciones. Para asegurar una función de resorte elástico, se aplicó una capa de Ecoliso de 1 cm

de espesor en la parte superior e inferior de los discos piezoeléctricos. Esto permitió ejercer presión sobre los componentes mencionados durante el momento en que el ciclista realiza las pedaladas, generando de esta manera energía eléctrica renovable. Se procedió a determinar la energía mecánica que sería aprovechada a través del diseño del generador piezoeléctrico con el fin de generar energía eléctrica renovable. Para ello, se tomó en consideración la masa de las tres personas de prueba (35 kg, 50 kg, 80 kg).

Para calcular la energía mecánica, se sumaron las contribuciones de la energía potencial gravitatoria y elástica, así como la energía cinética. Tras aplicar los principios teóricos correspondientes y calcular las energías potenciales gravitatorias (3,43 J, 4,9 J, 7,84 J), las energías potenciales elásticas (0,000276 J, 0,000264 J, 0,000158J) y las energías cinéticas (5,10 J, 4 J, 4,9 J), se obtuvo un total de (8,53 J, 8,9 J, 12,74 J) como energía mecánica aprovechable.

Se llevaron a cabo tres pruebas para evaluar la energía eléctrica renovable generada a partir de las diferentes cantidades de energía mecánica calculadas. Para la energía mecánica de 8.53 J, se obtuvieron resultados de (180 Wh, 141 Wh, 98 Wh), mientras que para la energía mecánica de 8.90 J se generaron (252 Wh, 205 Wh, 118 Wh), y para la última energía mecánica de 12.74 J se obtuvieron (264 Wh, 282 Wh, 301 Wh).

En cuanto al tiempo requerido para cargar una batería de 12 V con la energía eléctrica generada, se determinó que la primera obtención de energía mecánica (8.53 J) produjo 180 Wh de energía renovable, lo que implica una carga de la batería en 38 horas y 1 minuto. La segunda obtención de energía mecánica (8.90 J) generó 252 Wh de energía renovable, requiriendo 27 horas y 1 minuto para cargar la batería de 12 V. Finalmente, la última obtención de energía mecánica (12.74 J) produjo 301 Wh de energía renovable, lo que supuso un tiempo de carga de la batería de 23 horas.

En resumen, se ha presentado un diseño de sistema teórico capaz de aprovechar la energía mecánica generada por las personas al utilizar la bicicleta en una carretera, gracias al efecto piezoeléctrico.

### **Conclusiones**

- El estudio realizado de los sistemas y tecnologías piezoeléctricas permitió entender que son una tecnología de vanguardia en la búsqueda de fuentes de energía renovable y sostenible, estos dispositivos aprovechan la capacidad de ciertos materiales para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, lo que los hace prometedores en la producción de energía limpia, aunque se encuentran en etapas de desarrollo.
- El desarrollo del prototipo se basó en las características precisas de cada elemento utilizando SolidWorks para lograr un diseño compacto y simétrico con distancias óptimas entre componentes, asegurando una eficiencia máxima. Para el circuito electrónico y PCB, se empleó Proteus. Se eligió una conexión en paralelo para los piezoeléctricos, optimizando su operación en rango cuasi-estático, y se implementaron puentes de diodos para rectificar la señal de voltaje positivo y negativo generada. Se seleccionaron piezoeléctricos de 35 mm de diámetro para obtener picos de voltaje significativos, ajustando la cantidad para mejorar la funcionalidad.
- El sistema fue diseñado para su implementación, optimizando el espacio disponible. Durante la implementación, se emplearon soluciones de bajo costo, como Arduino IDE, Arduino Mega y módulo de medición de voltaje de Arduino, lo que resultó en resultados excelentes tanto en la programación, en la adquisición de datos e implementación del prototipo debido a que no se incurre en gastos excesivos siendo factible la implementación del prototipo.

## **Recomendaciones**

- Se propone llevar a cabo investigaciones en busca de nuevos materiales piezoeléctricos que ofrezcan una generación de corriente y potencia mejorada. Además, explorar avances en electrónica de potencia podría ayudar a superar las limitaciones existentes, permitiendo así el suministro de energía a cargas con mayores demandas. Mejorar estos parámetros no solo potenciaría la eficiencia de los sistemas de generación eléctrica con transductores piezoeléctricos, sino que también ampliaría su aplicabilidad en diversos escenarios.
- Se sugiere aprovechar diferentes componentes de la bicicleta, como las llantas, pedales y amortiguadores, para integrar dispositivos piezoeléctricos. Esta estrategia tiene el potencial de incrementar la generación de energía mediante el efecto piezoeléctrico, lo que resultaría en una mayor producción de potencia y corriente. Además, esta implementación contribuiría significativamente a la reducción del tiempo de carga de la batería, siendo uno de nuestros objetivos principales.

## Referencia

- A.Londoño, D. (2012). PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF FERROELECTRIC CERAMIC  $Pb(Zr,Ti)O_3$ . *PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF FERROELECTRIC CERAMIC  $Pb(Zr,Ti)O_3$* , 29. Cubana de fisica.
- Alguero, M. (2022). NUEVAS TECNOLOGÍAS CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS. *Diseño de nuevas cerámicas piezoeléctricas*. Retrieved from <https://wp.icmm.csic.es/eosmad/lineas-de-investigacion/ceramicas-piezoelectricas/#:~:text=Las%20cer%C3%A1micas%20piezoel%C3%A9ctricas%20son%20la,dispositivos%20de%20ac%C3%BAstica%20submarina%2C%20entre>
- Bhavsar, R. V. (2021). Inteligencia en materiales innovadores. 4. Retrieved from <https://silo.tips/download/inteligencia-en-materiales-innovadores>
- Brizuela, F. F. (2010). PRINCIPIOS DE TRANSDUCCION.
- Burbano Barahona, J. F. (2021). IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL GENERADOR DE ENERGIA ELECTRICA A TRAVÉS DE UNA BALDOSA CON ELEMENTOS PIEZOELECTRICOS. Bogota, Colombia.
- Cabrera Gómez, J., & Palomino Marín, E. (2001). *Calibración de acelerómetros piezoeléctricos empleando un instrumento virtual*. Retrieved from <https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/309/650>
- Castellanos, N. (2013, Octubre 16). Evaluación Preliminar del Uso del Efecto Piezoeléctrico para Generación de Energia.
- Costa de Oliveira, F. A., Lima Monteiro, D. G., & Colombo, D. M. (2021). Design, modeling, characterization and analysis of a low frequency micro-fabricated piezoelectric cantilever for vibration sensing and energy harvesting applications. 326.

De Sousa, C., & Manganiello, L. (2018). Review: Piezoelectric sensors applications in the detection of Contaminants in food.

Díez, P. G. (2018). *EEE International Symposium on* .

Edwin F, e. (2010, Abril 18). Diseño de transductor piezoeléctrico para generación de potencia. *18(1)*.

Euklidiadas, M. (2022, 07 Jueves). *TOMORROW.CITY*. Retrieved from <https://tomorrow.city/a/piezoelectricidad-generar-energia-con-movimiento#:~:text=La%20piezoelectricidad%20se%20perfila%20junto,dispositivos%20edge%20computing%20o%20IoT>.

Fernandez Galeano, A. E. (2018). Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medicion de fuerza. Retrieved from <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>

Fernández, A. (2018). Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de Valencia.

Fleming, A., & Reza Moheimani, S. (2006). Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping.

Garcia, J. I. (2012, junio). : Diseño de un prototipo para generación energética mediante tecnología piezoeléctrica. Aplicación a escaleras.

Gómez, Á. (2018). Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos.

Gonzales, E. (2012). EnergyMove: diseño de un dispositivo piezoeléctrico para harvesting de energia humana. Retrieved from <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/3222/1/TESIS.pdf>

- Guillén, M. &. (2017). ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL .
- Hernández, E., Gonzales , U., & Herrera, M. (2018). Vibraciones mecánicas. *Fuente de energia verde para microdispositivos*.
- Heung Soo Kim, J.-H. K. (2018). A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Bsed on Vibration.
- International, A. (2019). *PIEZOELECTRICITY*. Retrieved from <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>
- Jaramillo, J. &. (2015). Una aproximación a la naturaleza de la piezoelectricidad.
- Jiménez. (1995). Materiales piezoelétricos: formas de presentación,. 3-4.
- Kistler. (2018). Retrieved from <https://www.kistler.com/es/glosario/termino/sensor-de-presion-piezoelectrico/>
- Kokkinopoulos, V. (2014). Energy Harvesting Implementing Embedded Piezoelectric Generators – The Potential for the Attiki Odos Traffic Grid. *50*, 1070-1085. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.126>
- Latif, R., Noor, M. M., Yunas , J., & Hamzah, A. A. (2021). Mechanical Energy Sensing and Harvesting in Micromachined Polymer-Based Piezoelectric Transducers for Fully Implanted Hearing Systems: A Review. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/polym13142276>
- Lin, Z. (2020). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. .
- Mahesh Peddigari, M. S.-W.-J.-T.-H. (2021). Lifetime estimation of single crystal macro-fiber composite-based piezoelectric energy harvesters using accelerated life testing. *Nano Energy*, *88*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106279>.
- Malmcrona, M. (. (2018). Aplicaciones del efecto piezoelétrico para la generación de energía.

- Masch, F., Masante , A., Villegas, F., Lamas, L., Allochis, F., Ratkovich, F., & Hecker , R. (2022). Uso de materiales piezoeléctricos en ingeniería de precisión y en cosecha de energía. Retrieved from <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/Vetec/article/view/7205/7946>
- Matthey, J. (2017). Principio de funcionamiento de actuadores y sensores de flexión. Retrieved from <https://www.piezoproducts.com/technology/working-principle-piezo/>
- Mendoza, R. (2016). Extracción de energía del agua mediante generadores Piezoeléctricos.
- Mendoza, R. (2018). Extracción de energía del agua mediante generadores Piezoeléctricos.
- Mustapha, A. A., Ali, M. N., & Leong, S. K. (2016). Experimental Comparison of Piezoelectric Rectifying Circuits for Energy Harvesting .
- N. Maluf, K. W. (2004). Introduction to microelectromechanical . Artech House.
- Peña, H. &. (2008). Sal de rochelle. *Sal de rochelle*. Pueblo y Educacion.
- Pérez Miguel. Álvarez, J. C. (2004). Instrumentación electrónica. Thomson.
- Pradeesh, E. L., Udhayakumar, S., Vasundhara, M. G., & Vivek, V. (2020). Vibration Based Piezoelectric Energy Harvesting. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012007/pdf>
- S. O. R. Moheimani y A. J. Fleming. (2006). Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping. *Fundamentals of Piezoelectricity*, 9-35.
- Salem, S. (2023, Mayo). Harvesting energy of flow-induced vibrations using cylindrical piezoelectric transducers. 9, 279-285. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.113>
- Sharapov, V. (2011). Piezoceramic sensors.
- Sotelo, J. (2016). Visión de la aplicación de los sistemas piezoeléctricos para la generación .

- Urueña Orellana, C. A. (2021). *DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN ACELERÓMETRO BASADO EN EL USO*.
- Vargas, J. P. (2020, FEBRERO). ANÁLISIS COMPARATIVO DEL NIVEL DE ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDA POR BALDOSAS PIEZOELECTRICAS EN FUNCION DE SU FORMA GEOMETRICA. Retrieved from <https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6771/1/T-001547.pdf>
- Wang, Z. L. (2020, febrero). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. 68. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285519309796>
- Yongling et.al. (2021, Diciembre). Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review. 211. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110164>
- Zambrano, M. V., & Alves Pereira, A. E. (2004). Solucones Piezoelectricas. Retrieved from <https://aprenderly.com/doc/1632951/atcp-del-brasil>

## ANEXOS

### Anexo 1 Componentes de la base y recubrimiento



# FICHA TÉCNICA CAUCHO -BALDOSA

Plancha de caucho EPDM y SBR de alta Resistencia al impacto, con excelentes propiedades antidesgaste y antideslizantes. Su diseño impermeable y atractivo le permite brindar un ambiente seguro en zonas de actividad de fisica como gimnasios, clubes, colegios, jardines, etc.



### PRESENTACIÓN

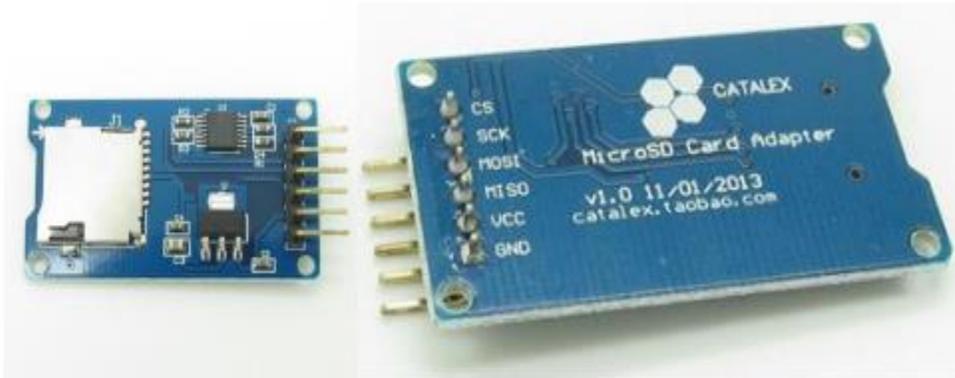
Código	Medidas
PG01	50cm x 50cm x 20mm de esp

### PROPIEDADES

Color :Negro con chispas azules  
Dureza :75 +/- 5 SHORE  
Resistencia a la flexión : Bueno  
Resistencia a la intemperie: Excelente  
Resistencia a la temperatura: Buena (-35 a 150C)  
Ozono : Excelente  
Oxígeno :  
Agua / Luz solar: Excelente  
Ácidos concentrados: Excelente  
Álcalis concentrados: Excelente  
Agua y vapor: Excelente



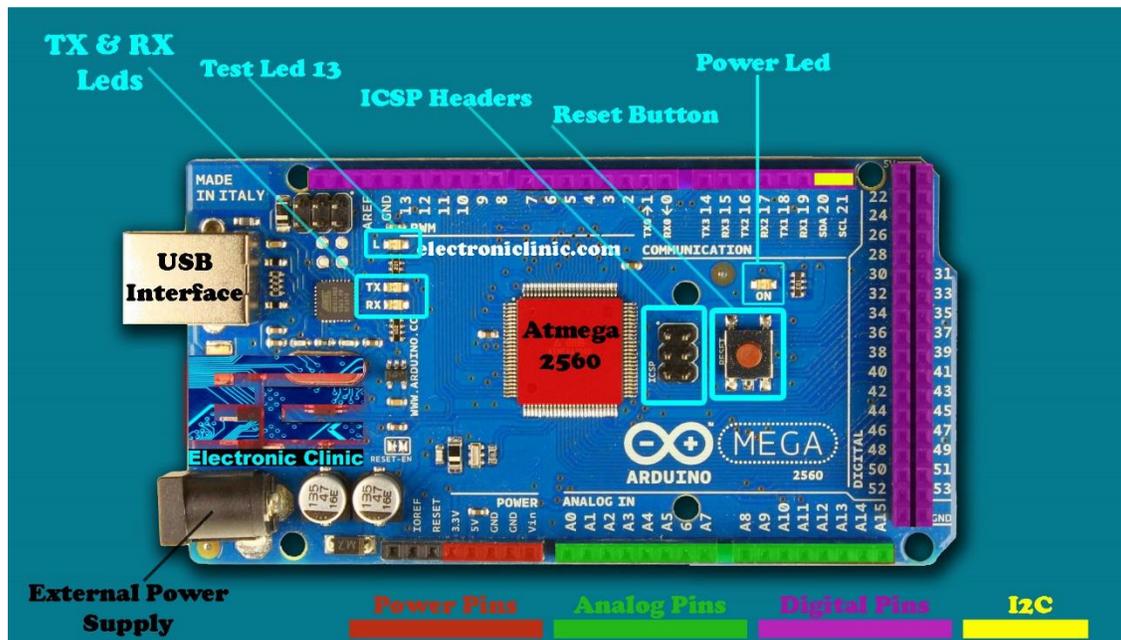
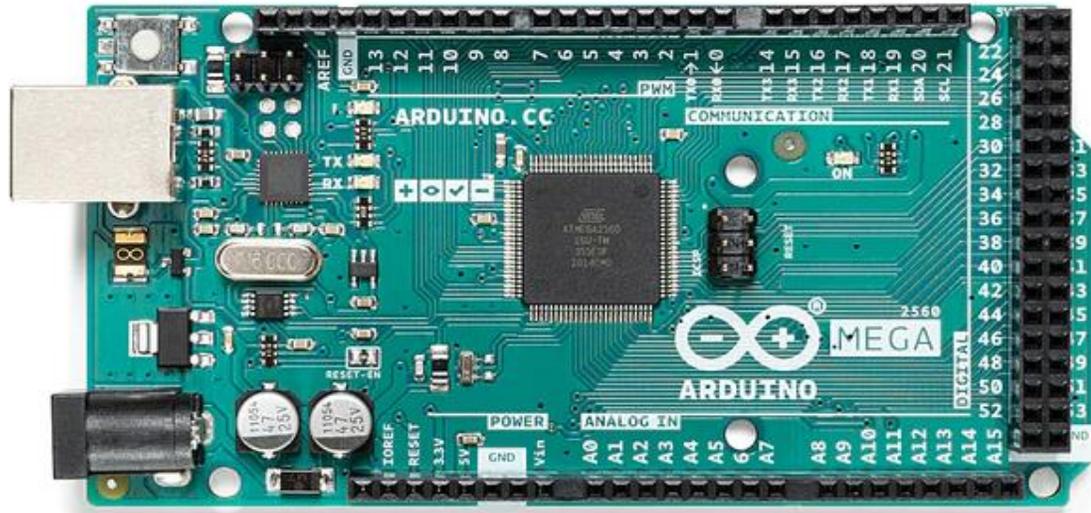
## Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino



### 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.

Anexo 3 Arduino Mega 25 Parámetros



Ref.	Description	Ref.	Description
USB	USB B Connector	F1	Chip Capacitor
IC1	5V Linear Regulator	X1	Power Jack Connector
JP5	Plated Holes	IC4	ATmega16U2 chip
PC1	Electrolytic Aluminum Capacitor	PC2	Electrolytic Aluminum Capacitor
D1	General Purpose Rectifier	D3	General Purpose Diode
L2	Fixed Inductor	IC3	ATmega2560 chip
ICSP	Connector Header	ON	Green LED
RN1	Resistor Array	XIO	Connector