



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE ALFOMBRA RECOLECTORA DE ENERGÍA  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE COSECHA DE ENERGÍA  
(ENERGY HARVESTING) UTILIZANDO DISPOSITIVOS  
PIEZOELÉCTRICOS PARA EL AHORRO DE CONSUMO DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Eddy Josué Alvarado Calle  
Cristopher Andrés Verdezoto León  
TUTOR: Carlos Fernando Chávez Córdova

Guayaquil - Ecuador

2023

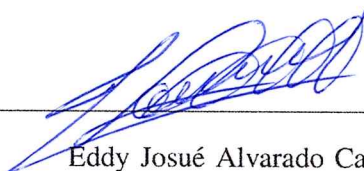
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Eddy Josué Alvarado Calle** con documento de identificación N° **0923298889** y **Cristopher Andrés Verdezoto León** con documento de identificación N° **0931296818**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

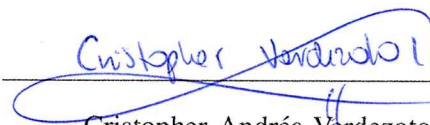
Guayaquil, 4 de marzo del año 2023

Atentamente,



---

Eddy Josué Alvarado Calle  
0923298889



---

Cristopher Andrés Verdezoto León  
0931296818

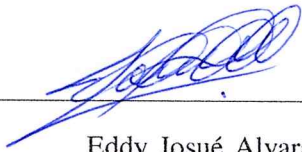
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Eddy Josué Alvarado Calle** con documento de identificación N° **0923298889** y **Cristopher Andrés Verdezoto León** con documento de identificación N° **0931296818**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE ALFOMBRA RECOLECTORA DE ENERGÍA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE COSECHA DE ENERGÍA (ENERGY HARVESTING) UTILIZANDO DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS PARA EL AHORRO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo a final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

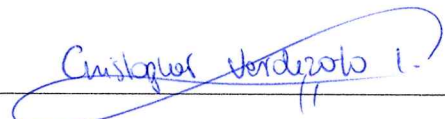
Guayaquil, 4 de marzo del año 2023

Atentamente,



---

Eddy Josué Alvarado Calle  
0923298889



---

Cristopher Andrés Verdezoto León  
0931296818

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Carlos Fernando Chávez Córdova**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE ALFOMBRA RECOLECTORA DE ENERGÍA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE COSECHA DE ENERGÍA (ENERGY HARVESTING) UTILIZANDO DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS PARA EL AHORRO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, realizado por **Eddy Josué Alvarado Calle** con documento de identificación N° **0923298889** y por **Cristopher Andrés Verdezoto León** con documento de identificación N° **0931296818**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 4 de marzo del año 2023

Atentamente,



---

Ing. Carlos Fernando Chávez Córdova, Mg.  
0919553438

## DEDICATORIA

Le dedico este trabajo de titulación a aquel que me dijo: Esfuérate y se valiente, no temas ni desmayes porque yo estoy contigo a donde quiera que vayas.

**Eddy Josué Alvarado Calle**

Dedico este trabajo de titulación a muchas personas, que a lo largo del camino, me han dado su apoyo de una u otra manera. Un camino que no ha sido perfecto ni precisamente corto, de hecho ha sido muy largo, pero gracias a mi esfuerzo y sobre todo al apoyo de ellos lo he sabido sobrellevar. Se lo dedico a mi papá, a mis amigos, a Jazmín, quién nunca dejó de creer en mí incluso cuando yo ya no quería hacerlo; pero sobre todo, a mi mamá. A ella porque a pesar de todos los malos ratos, decepciones y comienzos de cero, siempre me dio un empujoncito más para poder lograrlo. Dedico este proyecto a todos ellos, y agradezco con todo mi corazón a papá y mamá por siempre tratar de darme la mejor educación y las mejores oportunidades.

**Cristopher Andrés Verdezoto León**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios infinitamente por cada una de las bendiciones que ha derramado en mi vida. Su amor y misericordia han sido invaluable en todo momento, y por ello, siempre le estaré agradecido. También quiero expresar mi gratitud hacia mi madre, mujer luchadora, bendecida y esforzada que siempre lleno de amor y seguridad mi vida, a mi increíble padre, hombre cuya Fé es mas grande que el everest y su templanza mas fuerte que una roca y como no, a mi hermano, futuro hombrecito en cuyas venas corre la sangre que nos une y nos hace increíbles mi mejor amigo y mi mejor versión, ustedes son quienes han sido mi apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Doy gracias a Dios por ustedes, por su conocimiento, paciencia, amor, comprensión y educación que otorgaron cada día a mi vida. Y finalmente, un agradecimiento especial a mi novia, mujercita que ha estado a mi lado en todo este trayecto, brindándome su amor, cariño y compañía en cada momento. Tu presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable que solo Dios pudo otorgar, y por ello, te agradezco con todo mi corazón.

**Eddy Josué Alvarado Calle**

Agradezco mucho a papá y mamá, a los amigos que no me dejaron desistir, y a los que a lo largo del camino me han dejado una enseñanza invaluable para llegar a este punto.

Pero sobre todo, le agradezco mucho a Dios, por guiarme en el camino de la superación, y darme una segunda oportunidad para poder vivir este momento.

**Cristopher Andrés Verdezoto León**

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo de una alfombra recolectora de energía mediante la utilización de dispositivos piezoeléctricos para el almacenamiento, uso y, finalmente, ahorro de consumo de energía eléctrica. Este dispositivo se basa en un modelo común de alfombra adaptada a una pequeña rampa, misma que puede ser ubicada tanto en pisos como previo a escalones.

Para el desarrollo de este prototipo, se cuenta con dispositivos piezoeléctricos de material cerámico que permiten la generación de pequeños picos de potencia, por medio de la deformación de su material ante una fuerza que los presione. A continuación, el rectificador de corriente instalado en el circuito actúa para convertir la corriente alterna que proviene de los piezoeléctricos a ser corriente continua. Finalmente, una vez el usuario haya pisado la alfombra y libere su carga corporal de la alfombra, esta corriente será almacenada en un banco de baterías instalado en la rampa adaptada a la alfombra recolectora de energía.

Este proyecto tiene como referencia primaria los fundamentos del Energy Harvesting, también conocido como Cosecha de Energía, mismo que se basa en el aprovechamiento de cantidades ínfimas de energía de los entornos, las cuales de no ser aprovechadas terminarían disipándose en forma de calor, luz, vibraciones, etc.

**Palabras claves:** dispositivos piezoeléctricos, deformación, rectificador de corriente, corriente continua, corriente alterna, Energy Harvesting.

## ABSTRACT

The objective of this project is the implementation of a classifier module for carrying out control engineering practices. This system is based on a ball and beam model, which is one of the most widely used classical models for learning and designing controllers for unstable dynamic systems that are very complex to stabilize.

For the implementation of this prototype, there is an artificial vision system that allows the classification of the spheres considering their color and defining the location of the container where it should be stored. The infrared sensor then measures how far the sphere is from the reference point, and the controller in LabVIEW decides the required tilt of the beams to bring the sphere closer to the selected container location. Finally, when the sphere is in a certain section in the vicinity of the reference, the order is given to open the beams and fall into the corresponding container.

Finally, two controllers were designed and tuned: a proportional controller and a pole relocation controller using state feedback. For the design of these controllers, the linearized model of the plant was obtained and the calculations and simulations were carried out in MATLAB/Simulink. However, the tuning was done in LabVIEW with the prototype built where an Arduino board served as data acquisition card.

**Keywords:** control systems, ball and beam, artificial vision, PID, state feedback, root locus, MATLAB, LabVIEW, Arduino Uno.



## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	13
<b>II.</b>	<b>PROBLEMA</b>	14
<b>III.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	15
<b>IV.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	16
IV-A.	Objetivo general . . . . .	16
IV-B.	Objetivos específicos . . . . .	16
<b>V.</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	16
V-A.	Energy Harvesting . . . . .	16
V-B.	Generalidades y Fundamentos de los materiales piezoeléctricos . . . . .	16
V-C.	Historia de la Piezoelectricidad [35] . . . . .	17
V-D.	Aplicación de la piezoelectricidad en la historia . . . . .	17
V-E.	Aplicaciones en la actualidad . . . . .	17
V-F.	Impacto de los dispositivos piezoeléctricos en la actualidad . . . . .	18
V-G.	Patentes relacionadas a piezoeléctricos . . . . .	18
V-H.	Modelado eléctrico [1] de un elemento piezoeléctrico generador de energía . . . . .	18
V-I.	Incidencia de cargas sobre cerámicas piezoeléctricas . . . . .	21
V-J.	Incidencia de cargas cuasiestático sobre piezoeléctricos . . . . .	21
V-K.	Incidencia de cargas dinámicas sobre piezoeléctricos . . . . .	21
V-L.	Naturaleza del paso humano . . . . .	22
V-M.	Aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas . . . . .	23
V-N.	Generadores Piezoeléctricos . . . . .	23
V-Ñ.	Sensores Piezoeléctricos . . . . .	23
V-O.	Piezo Actuadores . . . . .	24
V-P.	Inversor de corriente 12/24V DC a 110/220V AC, Potencia 500W . . . . .	24
V-Q.	Batería de almacenamiento recargable de composición química . . . . .	25
V-R.	Regulador de carga . . . . .	26
V-S.	Luces LED . . . . .	27
<b>VI.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	27
VI-A.	Características técnicas calculadas y obtenidas del sensor piezoeléctrico . . . . .	27
VI-B.	Funcionamiento Mecánico . . . . .	28
VI-C.	Aplicación de matemáticas a los parámetros eléctricos . . . . .	28
VI-D.	Intensidad de la corriente . . . . .	29
VI-E.	Potencia producida por el dispositivo piezoeléctrico . . . . .	29
VI-F.	Fuerzas aplicada a los discos piezoeléctricos . . . . .	29
VI-G.	Área de contacto en el disco piezoeléctrico . . . . .	29
VI-H.	Cálculo de tensión por unidad de piezoeléctrico . . . . .	29
VI-I.	Tensión generada por un impulso en un único dispositivo piezoeléctrico . . . . .	30
VI-J.	Medición generada por pesos específicos en un dispositivo piezoeléctrico . . . . .	30
VI-K.	Construcción de la alfombra piezoeléctrica . . . . .	31
VI-K1.	Construcción de la base de alfombra piezoeléctrica . . . . .	31
VI-K2.	Asentamientos individuales para cada dispositivo piezoeléctrico . . . . .	31
VI-K3.	Adhesión de los dispositivos piezoeléctricos a la base . . . . .	32
VI-K4.	Interconexión de los dispositivos piezoeléctricos . . . . .	32
VI-K5.	Protección mecánica de los dispositivos piezoeléctricos . . . . .	33

VI-L.	Diseño e implementación de piezas para la construcción de la alfombra, por medio de impresión 3D . . . . .	33
VI-L1.	Tarugos impresos en 3D y su función en el modelo de alfombra . . . . .	33
VI-L2.	Anillos de guía para los dispositivos piezoeléctricos . . . . .	34
VI-L3.	Ensamblaje de alfombra . . . . .	35
VI-M.	Medidas y cálculos del muelle utilizado . . . . .	37
VI-N.	Conexión de los piezoeléctricos y selección de la mejor opción . . . . .	38
VI-N1.	Conexiones en Paralelo, Serie y Mixto . . . . .	38
VI-N2.	Tipo de Conexión usado . . . . .	38
VI-Ñ.	Instalación del prototipo, realización de pruebas e interpretación de resultados en campo (área determinada con tráfico peatonal) . . . . .	39
VI-Ñ1.	Instalación rampa con alfombra . . . . .	39
VI-Ñ2.	Distribución de circuitos y componentes . . . . .	39
VI-Ñ3.	Controlador PWM y salida de carga . . . . .	40
VI-O.	Pruebas de Voltaje en carga y descarga de la batería de almacenamiento . . . . .	41
VI-P.	Pruebas realizadas en un área específica en campo . . . . .	41
<b>VII.</b>	<b>RESULTADOS</b>	44
VII-A.	Gráficos de Voltaje y potencia en relación al tiempo en MATLAB . . . . .	44
VII-A1.	Gráfico Voltaje vs Tiempo . . . . .	44
VII-A2.	Gráfico Potencia vs Tiempo . . . . .	44
VII-B.	Obtención de voltajes por diferente localización de pisada en la alfombra y peso del usuario	45
VII-B1.	Valores de voltaje y corriente obtenidos por peso. Pruebas usando 60 piezoeléctricos	45
VII-B2.	Interpretación . . . . .	48
VII-B3.	Valores de voltaje y corriente obtenidos por peso. Pruebas usando 60 piezoeléctricos. Pisada completa con envío (salto) . . . . .	48
VII-B4.	Interpretación . . . . .	51
VII-C.	Cálculo de tiempo de deformación necesario para que fluya la corriente de 1 Amperio . . . . .	51
VII-D.	Cálculo de cantidad de pisadas para la obtención de voltajes útiles . . . . .	52
VII-E.	Gráficas de dispersión de datos: Voltaje generado vs Cantidad de pisadas en relación a pesos específicos de prueba . . . . .	53
VII-E1.	Voltaje vs Pisadas de una persona de 68kg . . . . .	53
VII-E2.	Voltaje vs Pisadas de una persona de 74kg . . . . .	53
VII-E3.	Voltaje vs Pisadas de una persona de 85kg . . . . .	53
VII-E4.	Voltaje vs Pisadas de una persona de 92kg . . . . .	54
VII-F.	Representación de mayor cantidad de energía generada dependiendo de pesos específicos . . . . .	55
<b>VIII.</b>	<b>CRONOGRAMA</b>	56
<b>IX.</b>	<b>PRESUPUESTO</b>	57
<b>X.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	58
<b>XI.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	58
<b>Apéndice A: Planos</b>		59
<b>Apéndice B: Evidencias de pruebas de funcionamiento de alfombra en campo</b>		62
<b>Apéndice C: Scripts de gráficas de dispersión por peso específico, elaborados en el software MATLAB</b>		63

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Modelado Eléctrico de un piezoeléctrico generador de Energía [19]. . . . .	19
2.	Descripción de variables del modelado [19]. . . . .	19
3.	Ecuación para obtención del apilamiento [19]. . . . .	19
4.	Descripción de variables en ecuación para obtención de apilamiento [19]. . . . .	19
5.	Ecuación para obtención de pérdidas dieléctricas [19]. . . . .	20
6.	Descripción de variables de ecuación de pérdidas dieléctricas [19]. . . . .	20
7.	Ecuación de Energía obtenida luego de deformación [19]. . . . .	20
8.	Descripción variable de carga almacenada [19]. . . . .	20
9.	Ecuación de Energía generada [19]. . . . .	21
10.	Gráfica del Piezoeléctrico Bajo Carga Cuasiestático [19]. . . . .	21
11.	Gráfica del Piezoeléctrico Bajo Carga Dinámica [19]. . . . .	22
12.	Etapas del Paso Humano [12]. . . . .	22
13.	Gráfica de Fuerza de Contacto vs Peso del Cuerpo [12]. . . . .	23
14.	Especificaciones geométricas del dispositivo piezoeléctrico utilizado. . . . .	28
15.	Lectura de tensiones generadas por el dispositivo piezoeléctrico. . . . .	30
16.	Plancha de Plywood a utilizarse, medidas (45x75x18). . . . .	31
17.	Asentamientos de PLA para fijar los discos piezoeléctricos a la base. . . . .	32
18.	Adhesión de los anillos y los dispositivos piezoeléctricos a la base de Plywood. . . . .	32
19.	Plano de dibujo de los tarugos. . . . .	33
20.	Tarugos impresos en 3D y su diseño interior. . . . .	34
21.	Modelado de discos de protección de los dispositivos piezoeléctricos. . . . .	34
22.	Plano de dibujo de los discos protectores de los elementos piezoeléctricos. . . . .	35
23.	Discos piezoeléctricos conectados entre sí en secuencia. . . . .	35
24.	Resortes para amortiguar el impacto durante el contacto del usuario con la alfombra. . . . .	36
25.	Tarugos instalados a la tapa posterior de la alfombra. . . . .	36
26.	Velcro adherido por sobre la tapa posterior de la alfombra. . . . .	37
27.	Referencia de dimensiones para selección de resorte a utilizarse. . . . .	37
28.	Realización de lecturas de tensión utilizando la alfombra. . . . .	39
29.	Alfombra recolectora instalada con su rampa. . . . .	39
30.	Rampa y sus puertos de salida de carga. . . . .	40
31.	Orden de conexiones de controlador PWM. . . . .	40
32.	Controlador instalado en la rampa y su salida 5V-1A. . . . .	40
33.	Pruebas de carga de celular y arranque de ventilador casero. . . . .	41
34.	Encendido de luminarias LED en rampa. . . . .	41
35.	Colocación de alfombra con rampa a la entrada de la sala de profesor Unidad Educativa Rashid Torbay. . . . .	42
36.	Pruebas realizadas con el personal docente a la entrada de la sala de profesores del establecimiento. . . . .	42
37.	Lectura de voltaje almacenado en alfombra antes de realizar las pruebas. . . . .	43
38.	Lectura de voltaje almacenado en alfombra después de realizar las pruebas. . . . .	43
39.	Voltaje vs Tiempo incidente en 15 piezoeléctricos. . . . .	44
40.	Potencia vs Tiempo incidente en 15 piezoeléctricos. . . . .	45
41.	Accionamiento de alfombra por el centro de la misma. . . . .	46
42.	Accionamiento de alfombra por la derecha de la misma. . . . .	47
43.	Accionamiento de alfombra por la izquierda de la misma. . . . .	48
44.	Accionamiento de alfombra por el centro de la misma. . . . .	49
45.	Accionamiento de alfombra por la derecha de la misma. . . . .	50
46.	Accionamiento de alfombra por la izquierda de la misma. . . . .	51
47.	Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 68kg . . . . .	53
48.	Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 74kg . . . . .	53
49.	Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 85kg . . . . .	54

50.	Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 92kg . . . . .	54
51.	Representación de mayores valores de voltaje generados en relación a pesos específicos . . . . .	55
52.	Cronograma de Trabajo . . . . .	56
53.	Anillo Piezoeléctrico, por E. Alvarado y C. Verdezoto, Autodesk Inventor . . . . .	59
54.	Vista isométrica Base de Tarugos, por E. Alvarado y C. Verdezoto, Autodesk Inventor . . . . .	60
55.	Vista superior Base de Tarugos, por E. Alvarado y C. Verdezoto, Autodesk Inventor . . . . .	61
56.	Carga de dispositivo móvil mientras se realiza la deformación de piezoeléctricos, por E. Alvarado y C. Verdezoto . . . . .	62
57.	Lectura durante utilización de alfombra piezoeléctrica, por E. Alvarado y C. Verdezoto . . . . .	62
58.	Medición de variación de tensión durante utilización de alfombra piezoeléctrica, por E. Alvarado y C. Verdezoto . . . . .	63
59.	Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 68kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto	63
60.	Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 74kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto	64
61.	Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 85kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto	64
62.	Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 92kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto	65

## I. INTRODUCCIÓN

El Energy Harvesting es una tecnología innovadora que consiste en la captura y conversión de energía ambiental a energía eléctrica. Esta energía recolectada se puede usar para alimentar dispositivos electrónicos y sistemas de bajo y alto consumo, que puede ser utilizada luego de ser almacenada en baterías o pilas. Esta técnica se basa en la captura de pequeñas cantidades de energía mecánica aplicada mediante pisadas sobre la alfombra, que a su vez producirán una deformación en el cristal de cuarzo del dispositivo piezoeléctrico y estas producirán energía eléctrica que posteriormente será almacenada y utilizada.

Basándonos en los estudios realizados se concluyó que si recolectamos el impacto de una pisada humana sobre un conjunto de dispositivos piezoeléctricos estos serán posibles ser almacenados y utilizados, sabiendo que no solo podemos basarnos en pisadas sino también en esfuerzos mecánicos aplicados sobre los piezoeléctricos como también desde ondas de radio y señales Wi-Fi hasta luces o aparatos de refrigeración o calefacción. El Energy Harvesting ofrece una solución para aprovechar esta energía disponible y reducir el impacto ambiental para cumplir con los objetivos de emisiones para 2050. Además, esta tecnología se está aplicando cada vez más para llevar a cabo proyectos innovadores como el desarrollo de generadores de energía a partir de la luz solar, eólica y de biomasa.

La adaptación del sistema de alfombra piezoeléctrica será aplicada en los accesos peatonales de establecimientos predeterminados con mucha concurrencia de tráfico peatonal, pues así será posible efectuar la recolección de las pisadas que producidas por un esfuerzo humano serán aprovechadas por los dispositivos piezoeléctricos y producir a su vez la energía eléctrica que será recolectada y almacenada para ser utilizada posteriormente.

## II. PROBLEMA

La relación entre la futura escasez de combustibles fósiles y el constante avance tecnológico en el mercado mundial tiene como respuesta el incremento de esfuerzos en el desarrollo energético, y la búsqueda de más eficaces fuentes de energía que se adapten de mejor manera al contexto social de cada país; buscando de esta manera mitigar las condiciones medioambientales que sufre el planeta en la actualidad.

En el Ecuador, se utilizan múltiples métodos de generación de energía para cumplir la demanda residencial, comercial y a su vez los compromisos de exportación de energía que existen con los países vecinos de Perú y Colombia. Además, se conoce que la producción de energía eléctrica se diversifica en tres distintos métodos: por vías renovables, por vías no renovables y por importación de dichos países vecinos. Es así como en el año 2021, Ecuador registra un total de 91.73 % de energía eléctrica destinada al servicio público proveniente de fuentes renovables, siendo la vía dominante la generación de energía eléctrica por métodos hidráulico, con un 90.65 % en total [8].

A partir de los datos mencionados, se comprende la dependencia del Ecuador en el método de generación de energía por medio de centrales hidroeléctricas, siendo esta la responsable de producir la energía eléctrica que consumirá al menos el 90 % del país[8]. A su vez, se nota la importancia de tener estas fuentes de generación de energía habilitadas y en óptimo estado para evitar posibles desabastecimientos de energía eléctrica a la población. Por otra parte, todos estos indicadores evidencian la necesidad del Ecuador de impulsar la investigación y promover la búsqueda de nuevas energías alternativas sustentables, mismas que puedan verse involucradas en la sociedad y sean aplicadas para contribuir a las necesidades energéticas del sector público y comercial.

### III. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, el avance tecnológico en el mundo insiste en la búsqueda e implementación de múltiples métodos para producir y almacenar energía limpia, de menor impacto para el medio ambiente, sobre todo por medios solares, eólicos, mecánicos, etc. El enfoque del proyecto presentado instala sus bases en el concepto de Energy Harvesting, o recolección de energía, para así obtener energía de manera gratuita, utilizando un método sostenible y de fácil instalación en la sociedad.

Basados en la captación de energía ambiental, este proceso nos permite capturar la energía de entornos con cierta afluencia de personas, ya sea abierto o cerrado, para luego convertirla en energía eléctrica. Esta energía será de naturaleza mecánica, generada exclusivamente por la deformación de elementos piezoeléctricos, instalados por medio de un circuito en una superficie tipo alfombra. Esta alfombra será instalada en espacios que sean tanto entradas como salidas de un establecimiento.

La energía recolectada será almacenada, aprovechando las más mínimas cantidades de energía en el entorno, que en caso de no ser utilizada se disiparía o desperdiciaría en distintas formas, calor, luz, vibración etc. Estas pequeñas cantidades de energía, acumuladas pueden terminar siendo suficientes para alimentar pequeños dispositivos eléctricos o electrónicos que lleven funcionalidades requeridas e importantes por parte de sus usuarios.

## IV. OBJETIVOS

### IV-A. *Objetivo general*

Implementar un sistema de recaudación de energía eléctrica producida por la deformación de elementos piezoeléctricos, posicionados en una alfombra utilizada en el acceso peatonal de un establecimiento.

### IV-B. *Objetivos específicos*

- Investigar los principios del Energy Harvesting dentro del modelo de alfombra receptora de energía.
- Implementar el sistema de recaudación de energía tomando en cuenta los estudios previamente realizados.
- Almacenar la energía recogida mediante efectos piezoeléctricos en una batería de almacenamiento.
- Adaptar el modelo recolector de energía para la iluminación de un espacio físico, o un dispositivo que requiera alimentación eléctrica.

## V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### V-A. *Energy Harvesting*

El Energy Harvesting es una tecnología innovadora que consiste en la captura y conversión de energía ambiental [30] a energía eléctrica. Esta energía recolectada se puede usar para alimentar dispositivos electrónicos y sistemas de bajo y alto consumo, que puede ser utilizada luego de ser almacenada en baterías o pilas. Esta técnica se basa en la captura de pequeñas cantidades de energía mecánica aplicada mediante pisadas sobre la alfombra, que a su vez producirán una deformación en el cristal de cuarzo del dispositivo piezoeléctrico y estas producirán energía eléctrica que posteriormente será almacenada y utilizada[11].

Basándonos en los estudios realizados se concluyó que si recolectamos el impacto de una pisada humana sobre un conjunto de dispositivos piezoeléctricos estos serán posibles ser almacenados y utilizados, sabiendo que no solo podemos basarnos en pisadas sino también en esfuerzos mecánicos aplicados sobre los piezoeléctricos como también desde ondas de radio y señales Wi-Fi hasta luces o aparatos de refrigeración o calefacción. El Energy Harvesting ofrece una solución para aprovechar esta energía disponible y reducir el impacto ambiental para cumplir con los objetivos de emisiones para 2050. Además, esta tecnología se está aplicando cada vez más para llevar a cabo proyectos innovadores como el desarrollo de generadores de energía a partir de la luz solar, eólica y de biomasa.

La adaptación del sistema de alfombra piezoeléctrica será aplicada en los accesos peatonales de establecimientos predeterminados con mucha concurrencia de tráfico peatonal, pues así será posible efectuar la recolección de las pisadas que producidas por un esfuerzo humano serán aprovechadas por los dispositivos piezoeléctricos y producir a su vez la energía eléctrica que será recolectada y almacenada para ser utilizada posteriormente.

### V-B. *Generalidades y Fundamentos de los materiales piezoeléctricos*

Un piezoeléctrico es un material que tiene la propiedad de convertir la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Esta propiedad se conoce como piezoelectricidad. Los cristales naturales y sintéticos, cerámicas y polímeros son ejemplos de materiales piezoeléctricos[24]. La piezoelectricidad se basa en el fenómeno de polarización eléctrica, que ocurre cuando se aplica una tensión mecánica a un cristal piezoeléctrico. La tensión mecánica provoca una distorsión en la estructura cristalina del material, lo que a su vez provoca una polarización eléctrica. Esto significa que se generan cargas eléctricas en los extremos del cristal. Esta polarización eléctrica puede ser detectada mediante un circuito externo y utilizada como una señal eléctrica [20]. La piezoelectricidad también funciona en sentido inverso. Si se aplica una corriente eléctrica a un cristal piezoeléctrico, se produce una distorsión en la estructura cristalina del material, lo que a su vez provoca una deformación mecánica. Esto se conoce como el efecto piezoeléctrico inversor. Este efecto se utiliza en dispositivos llamados actuadores piezoeléctricos, que convierten la energía eléctrica en energía mecánica y se utilizan en una variedad de aplicaciones, como sensores de presión, acelerómetros, micrófonos y altavoces.



#### V-C. *Historia de la Piezoelectricidad [35]*

La piezoelectricidad fue descubierta por los hermanos Pierre y Jacques Curie en 1880 mientras investigaban el efecto de la compresión en el cuarzo. Al comprimir el cuarzo, las cargas en la materia se desplazan, lo que provoca una polarización de la carga y la generación de un arco eléctrico.

La palabra piezo proviene del griego y significa comprimir ó presionar, y el efecto piezoeléctrico se refiere a la generación de electricidad a través de la aplicación de presión. Este efecto fue descubierto en 1880 por los hermanos Jacques y Pierre Curie mediante experimentos en los que medían las cargas que aparecían en las superficies de cristales especialmente preparados, como el cuarzo, el topacio, las sales de Rochelle, el azúcar de caña y la turmalina, cuando se sometían a tensiones mecánicas. Los hermanos Jacques y Pierre Curie, que descubrieron el efecto piezoeléctrico en 1880, no preveían que los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico directo (es decir, que producen cargas eléctricas cuando se someten a estrés mecánico) también mostrarían un efecto piezoeléctrico inverso (es decir, que producen tensiones mecánicas cuando se someten a un campo eléctrico). Esta propiedad fue deducida matemáticamente utilizando principios termodinámicos fundamentales deducidos por el físico Gabriel Lippman en 1881. A raíz de esto, los hermanos Curie comprobaron de inmediato la existencia del efecto inverso mediante experimentos y continuaron investigando hasta obtener pruebas cuantitativas de la reversibilidad completa de las deformaciones electro-elástico-mecánicas de los cristales piezoeléctricos. Durante los años siguientes, la comunidad científica europea continuó investigando las aplicaciones de los cristales piezoeléctricos en la ciencia, identificando los cristales piezoeléctricos en base a las estructuras asimétricas de los cristales y estableciendo la utilidad de la termodinámica para cuantificar las relaciones entre las variables mecánicas, térmicas y eléctricas. Muchos trabajos fueron realizados hasta que, en 1910, Woldemar Voigt publicó su libro "Lehrbuch der Kristallphysik" (libro de texto sobre la física cristalina), que se convirtió en un estándar de referencia sobre el tema [35].

#### V-D. *Aplicación de la piezoelectricidad en la historia*

La primera aplicación práctica de los dispositivos piezoeléctricos tuvo lugar durante la Primera Guerra Mundial. En Francia, hacia 1917, Paul Langevin desarrolló un detector de submarinos por ultrasonido (sonar) que consistía en láminas delgadas de cuarzo pegadas entre dos placas de acero y montadas en un soporte capaz de resistir la inmersión. Este sonar tenía una frecuencia de resonancia de 50 kHz. Después de la Primera Guerra Mundial, debido a las dificultades para operar los transductores construidos con cristales de cuarzo, ya que requerían generadores de alta tensión para ser excitados, se comenzó a buscar materiales piezoeléctricos sintéticos. Estos esfuerzos llevaron al descubrimiento y perfeccionamiento, durante las décadas de 1940 y 1950, de las cerámicas piezoeléctricas de titanato de bario por la entonces Unión Soviética y Japón, y de las cerámicas piezoeléctricas de titanato zirconita de plomo (PZT) por los Estados Unidos. El desarrollo de las cerámicas piezoeléctricas fue revolucionario, ya que además de presentar mejores propiedades que los cristales, después de ser "polarizadas", también permiten geometrías y dimensiones flexibles ya que son fabricadas mediante sinterización de polvos cerámicos y conformadas a través de prensado o extrusión. Actualmente, las cerámicas piezoeléctricas tipo PZT, en sus diversas variaciones, son las cerámicas predominantes en el mercado.

#### V-E. *Aplicaciones en la actualidad*

Actualmente, los dispositivos piezoeléctricos se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo:

- **Sensores:** Los sensores piezoeléctricos se utilizan para medir la presión, la fuerza, la aceleración y el nivel de fluidos.[6]
- **Actuadores:** Los actuadores piezoeléctricos se utilizan para generar movimiento preciso en aplicaciones tales como la automatización, la robótica y la medición de precisión.[7]
- **Generadores de alta frecuencia:** Los generadores piezoeléctricos se utilizan para generar altas frecuencias para aplicaciones como el sonar en barcos, la medicina y la industria.[3]
- **Transductores de ultrasonido:** Los transductores piezoeléctricos se utilizan en el sonar, la medicina y la industria para generar y detectar ondas de ultrasonido.[33]
- **Sistemas de encendido:** Los sistemas de encendido piezoeléctricos se utilizan en motores de combustión interna para generar chispas para encender la mezcla de combustible y aire.[32]

- Dispositivos para la medicina [34]: Los dispositivos piezoeléctricos se utilizan en la medicina para tratar enfermedades óseas y dental.
- Aplicaciones de Energía: Los dispositivos piezoeléctricos se utilizan para generar energía a partir de movimientos ambientales como el viento y la ola del mar. [28]

#### *V-F. Impacto de los dispositivos piezoeléctricos en la actualidad*

Los dispositivos piezoeléctricos tienen un gran impacto en la sociedad actual [22], ya que se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde sensores y actuadores en dispositivos electrónicos hasta generadores de energía y dispositivos de medición en sistemas de infraestructura críticos. Algunos ejemplos de cómo los dispositivos piezoeléctricos tienen un impacto en la sociedad actual incluyen:

- Mejora de la seguridad en los vehículos [23]: Los sensores de presión piezoeléctricos se utilizan en los sistemas de frenos ABS de los automóviles, lo que ayuda a mejorar la seguridad al proporcionar una detección precisa de la presión de frenado y reducir el riesgo de bloqueo de las ruedas.
- Mejora de la eficiencia energética: Los generadores de energía piezoeléctricos [17] se utilizan en una variedad de aplicaciones, como la recuperación de energía cinética en edificios y puentes, lo que ayuda a mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.
- Mejora de la calidad de vida: los dispositivos piezoeléctricos se utilizan en dispositivos médicos [29], como prótesis y audífonos, lo que ayuda a mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades.
- Sistemas de encendido:[4] Los sistemas de encendido piezoeléctricos se utilizan en motores de combustión interna para generar chispas para encender la mezcla de combustible y aire.
- Mejora de la eficiencia en la industria [15]: Los sensores y actuadores piezoeléctricos se utilizan en una variedad de procesos industriales, como la medición de presión y la detección de vibraciones, lo que ayuda a mejorar la eficiencia y reducir los costos.

#### *V-G. Patentes relacionadas a piezoeléctricos*

Existen patentes relacionadas con materiales piezoeléctricos. Los materiales piezoeléctricos son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones [27], y las patentes relacionadas con estos materiales pueden incluir nuevos diseños de dispositivos y procesos de fabricación, así como mejoras en las propiedades de los materiales existentes. Algunos ejemplos de patentes relacionadas con materiales piezoeléctricos incluyen:

- Patentes para nuevos diseños de sensores de presión y acelerómetros [26] utilizando materiales piezoeléctricos.
- Patentes para procesos de fabricación de cerámica piezoeléctrica con mejores propiedades mecánicas y piezoeléctricas.[5]
- Patentes para generadores de energía piezoeléctricos basados en movimientos humanos o ambientales [8].
- Patentes para dispositivos de medición de deformación y esfuerzo utilizando materiales piezoeléctricos.[13]

#### *V-H. Modelado eléctrico [1] de un elemento piezoeléctrico generador de energía*

Procedemos a realizar un modelo eléctrico del material piezoeléctrico a utilizarse, y a su vez analizar las diferentes variables en torno a su funcionamiento como generador de energía eléctrica. Además, se realiza un análisis de la forma de onda al soportar cargas cuasiestático y cargas dinámicas. A partir de lo mencionado, se realizará una evaluación y elección de la mejor alternativa. El circuito eléctrico de un material piezoeléctrico se puede encontrar como:

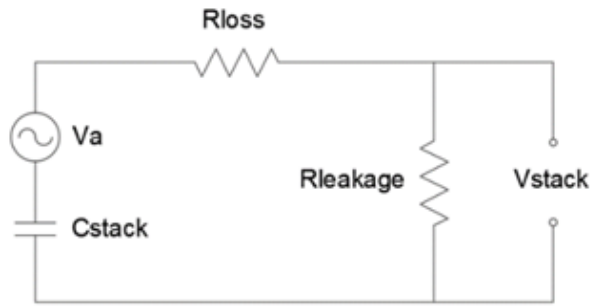


Figura 1. Modelado Eléctrico de un piezoeléctrico generador de Energía [19].

En donde:

*Cstack*: Capacitancia de apilamiento

*Rloss*: Resistencia por pérdidas

*Rleakage*: Resistencia por fuga

*Va*: Tensión en circuito abierto producido en el piezoeléctrico como resultado de una fuerza aplicada

Figura 2. Descripción de variables del modelado [19].

El apilamiento puede expresarse como se muestra en la siguiente figura:

$$Cstack = \epsilon_0 \epsilon_r A / h_{piezo}$$

Figura 3. Ecuación para obtención del apilamiento [19].

En dónde:

$\epsilon_0$ : Permisividad libre del espacio =  $8.85 \times 10^{-12}[Fm]$

$\epsilon_r$ : Permisividad relativa del material piezoeléctrico

*A*: Área transversal del piezoeléctrico

*hpiezo*: Espesor del piezoeléctrico

Figura 4. Descripción de variables en ecuación para obtención de apilamiento [19].

Además, se encuentra una resistencia en serie en el piezoeléctrico, la misma que denota las pérdidas dieléctricas del mismo, formulada de acuerdo con la siguiente figura:

$$R_{loss} = \tan\delta \omega C_{stack}$$

Figura 5. Ecuación para obtención de pérdidas dieléctricas [19].

En dónde:

$\omega$ : Frecuencia angular de operación del generador

$\tan\delta$ : Factor de disipación

Figura 6. Descripción de variables de ecuación de pérdidas dieléctricas [19].

Cumpliendo con las ecuaciones antes mostradas, se logra expresar a la energía eléctrica, resultante del efecto de compresión en el material, y a su vez almacenada en el piezoeléctrico, como se muestra en la siguiente figura:

$$W_{eléctrica} = q^2 / 2 C_{stack}$$

Figura 7. Ecuación de Energía obtenida luego de deformación [19].

En dónde:

$q = C_{stack} \times V_a$ : Es la carga eléctrica almacenada en el material.

Figura 8. Descripción variable de carga almacenada [19].

Finalmente, se logra expresar una ecuación de modo general para la obtención de  $V_a$ , mostrada en la figura a continuación:

$$Va = (k33 F h_{piezo} / A) * (1 / \sqrt{0.5 Y \epsilon_0 \epsilon_r})$$

Figura 9. Ecuación de Energía generada [19].

#### V-I. Incidencia de cargas sobre cerámicas piezoeléctricas

Respecto a nuestro proyecto a elaborarse, tenemos previsto establecer esta alfombra recolectora de energía en la entrada de uno de los edificios estudiantiles de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil. Debido a esto, es necesario entender el flujo de estudiantes variado que existe de acuerdo con la sesión, sea matutina o nocturna. Es importante notar este factor, dado que se observamos mayor afluencia de estudiantes y flujos altos de los mismo entrando a los edificios en el horario nocturno. A partir de estos factores, establecemos nuestra investigación a su vez en los diferentes tipos de carga que podría soportar la alfombra recolectora de energía al ser establecida en la entrada de uno de estos edificios. Se estima que, de ser colocada durante los horarios de la sesión nocturna, la alfombra podría verse afectada por cargas de tipo cuasiestático así como bajo cargas dinámicas. Como una primera instancia, se considera solamente el comportamiento del paso humano, así como de las diferentes cargas que puede llegar a variar durante el cambio de pies al momento de caminar.

#### V-J. Incidencia de cargas cuasiestático sobre piezoeléctricos

En la imagen mostrada a continuación, se evidencia la manera en que una carga incide en el piezoeléctrico al estar posicionada sobre el durante un mayor periodo de tiempo. Esto en comparación con el tiempo de carga de su capacitor. Se observa un pico positivo de tensión una vez aplicada la fuerza y otro negativo al retirar la misma.

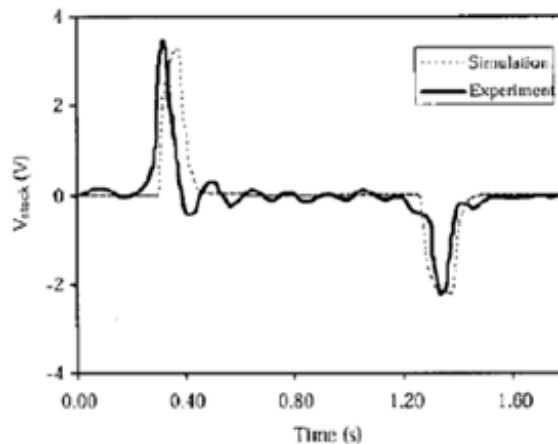


Figura 10. Gráfica del Piezoeléctrico Bajo Carga Cuasiestático [19].

#### V-K. Incidencia de cargas dinámicas sobre piezoeléctricos

Para el caso de una carga dinámica, la misma es aplicada en menor tiempo en relación al capacitor y su constante de carga. En la imagen mostrada a continuación, se observa que presenta solamente un aumento positivo de tensión.

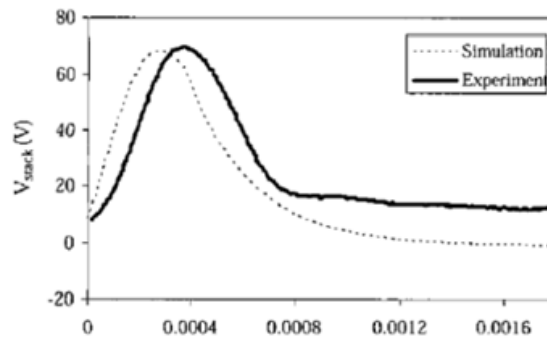


Figura 11. Gráfica del Piezoeléctrico Bajo Carga Dinámica [19].

### V-L. Naturaleza del paso humano

Al estar enfocado nuestro proyecto a la generación de energía eléctrica por medio de una interacción entre elementos piezoeléctricos y cargas motrices que incidan sobre los mismos, representados por el flujo de ingreso y salida de estudiantes en los edificios de la Universidad Politécnica Salesiana, es de suma relevancia conocer con gran detalle el comportamiento del paso o caminar humano. Variables como la frecuencia y la fuerza que este paso ejerza sobre el suelo serán de suma consideración para evaluar y optimizar el comportamiento de los materiales piezoeléctricos.

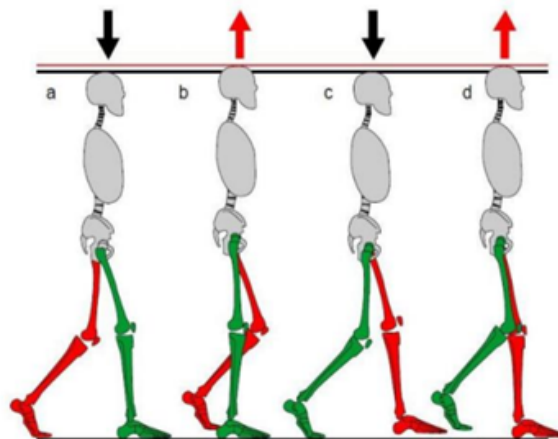


Figura 12. Etapas del Paso Humano [12].

Para esta sección, se enfatiza en la siguiente definición: Cuando se corre, hay momentos en que ambos pies no tocan el suelo. (Feldmann, 2009) Entonces, haciendo énfasis en el caminar, las fases se podrían describir como:

- Se inicia con la pierna derecha, específicamente el pie mostrado en color verde, el cual toca el suelo con el talón.
- En la siguiente fase, la pierna derecha se irgue o estira completamente, donde se transmite el peso del cuerpo a través de la misma.
- En esta fase, existe un intercambio de carga en los pies, pasando del pie derecho al pie izquierdo en modo de balanceo. Se observa que la pierna izquierda se balancea hacia adelante.
- El pie izquierdo, en color rojo, asume la carga mientras el pie derecho comienza a balancearse hacia adelante, y de este modo terminar el ciclo.

Es importante indicar que tanto la duración del paso del ser humano como la distribución del peso de la persona en cuestión sobre el suelo, durante un tiempo establecido, dependerán exclusivamente del ritmo o frecuencia de paso

de la persona. A continuación, observamos una ilustración donde se muestran dos frecuencias de paso diferentes, donde las amplitudes esta relacionadas al peso relativo de cada persona [19].

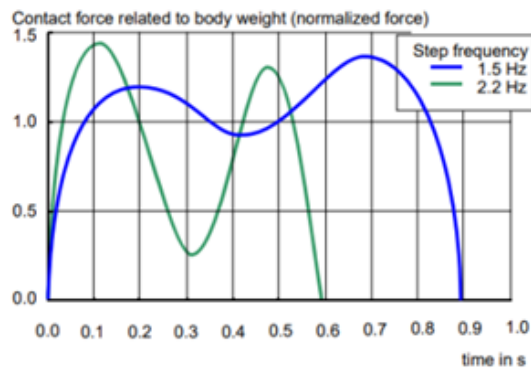


Figura 13. Gráfica de Fuerza de Contacto vs Peso del Cuerpo [12].

Analizando la imagen mostrada previamente, se observa que la forma de ondas varia en dependencia a la frecuencia del paso humano. Se estima que la velocidad promedio de cada ciclo de paso humano es de entre 1m/s a 1,2m/s. y que la duración de cada pie en un ciclo de pasos completo es de entre el 60% y 90% del total del ciclo.

#### V-M. Aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas

Existe una vasta gama de aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas. En esta sección, trataremos de abarcar información importante de cada una de estas aplicaciones. Existen cuatro categorías generales dentro de los dispositivos piezoeléctricos:

- Generadores.
- Sensores.
- Actuadores.
- Transductores.

#### V-N. Generadores Piezoeléctricos

La generación y consumo de energía siguen siendo un obstáculo en el avance de nuevos dispositivos, como por ejemplo las nuevas MEMS (sistemas microelectromecánicos) como elementos complementarios a los CMOS (semiconductores de óxido metálico) puesto que el avance implicaría alejarse de la Ley de Moore que relaciona la capacidad de almacenamiento con el tamaño del dispositivo y su consumo de energía [19]. Los materiales y cerámicas piezoeléctricas tienen la capacidad de generar tensiones que satisfagan necesidades básicas, como el funcionamiento de dispositivos de ignición de los quemadores de combustible, estufas, entre otros. Los sistemas de encendido configurados con sistemas piezoeléctricos son pequeños y sencillos, incluso llegan a posiblemente ser miniaturizados. Estas características brindan ventajas respecto a los sistemas convencionales, que incluyen imanes permanentes o transformadores de alto voltaje.

#### V-Ñ. Sensores Piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos tienen la capacidad de convertir un parámetro físico, como por ejemplo la aceleración o la presión, en una señal eléctrica. Ciertos sensores de este tipo reciben el parámetro físico de manera directa sobre el piezoeléctrico, mientras que en otros dispositivos una señal de tipo acústica crea vibraciones en el elemento y estas, a su vez, se convierten en una señal eléctrica. Por lo general, estos sistemas proporcionan respuestas visuales, audibles o físicas a la entrada desde el sensor piezoeléctrico, como lo podemos observar, a manera de ejemplo, en los cinturones de seguridad de automóviles como una respuesta a una desaceleración rápida y brusca.

### V-O. Piezo Actuadores

Los actuadores piezoeléctricos transforman una señal eléctrica en un desplazamiento físico, que a su vez es controlado con precisión, como por ejemplo: en el ajuste de herramientas de mecanizado de precisión, lentes o espejos. Este tipo de actuadores también se utiliza para el control de válvulas hidráulicas, como bombas de bajo volumen o motores de propósito especial. Una desventaja de este tipo de material piezoeléctrico es que son afectados por las pérdidas de eficiencia de energía, lo cual limita la miniaturización de los motores electromagnéticos, construyéndose así en tamaños de menos de un centímetro cúbico. Una ventaja adicional, potencialmente importante, para los motores piezoeléctricos es la ausencia de ruido electromagnético [19].

### V-P. Inversor de corriente 12/24V DC a 110/220V AC, Potencia 500W

Un inversor de corriente es un dispositivo que convierte la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Este tipo de dispositivo se utiliza comúnmente en aplicaciones donde se necesita energía eléctrica de CA a partir de una fuente de alimentación de CC, como en sistemas fotovoltaicos, sistemas de respaldo de batería y sistemas de energía portátiles [2].

El inversor de corriente funciona mediante la conversión de la energía de CC en una forma de energía de CA que es adecuada para la mayoría de las aplicaciones de consumo de energía eléctrica [10]. El inversor consta de varios componentes, incluyendo un rectificador, un filtro, un oscilador y un transformador. El rectificador convierte la corriente de entrada de CC en una forma de energía de CC más suave y filtrada. El oscilador genera una señal de CA de alta frecuencia que se utiliza para impulsar el transformador. El transformador transforma la señal de alta frecuencia en una señal de baja frecuencia de 60 Hz o 50 Hz que se utiliza para alimentar los dispositivos eléctricos de CA.

La estructura electrónica del inversor de corriente puede ser de dos tipos: onda cuadrada y onda sinusoidal. Los inversores de onda cuadrada son más simples y económicos, pero producen una forma de onda más brusca que puede no ser adecuada para algunos equipos electrónicos sensibles [16]. Los inversores de onda sinusoidal son más complejos y costosos, pero producen una forma de onda más suave y limpia que es adecuada para la mayoría de los equipos electrónicos.

En resumen, un inversor de corriente es un dispositivo electrónico que se utiliza para convertir la corriente continua en corriente alterna. Se compone de varios componentes, incluyendo un rectificador, un filtro, un oscilador y un transformador, y puede generar una señal de CA de onda cuadrada o sinusoidal. El inversor de corriente se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones donde se necesita energía eléctrica de CA a partir de una fuente de alimentación de CC.

La cantidad de watts que puede proporcionar un inversor determina la cantidad de carga eléctrica que se puede alimentar y, por lo tanto, la cantidad de dispositivos eléctricos que se pueden usar al mismo tiempo [31]. Cuanto mayor sea la cantidad de watts que puede proporcionar un inversor, mayor será la carga eléctrica que se puede alimentar. Si se intenta alimentar una carga eléctrica mayor que la capacidad de watts del inversor, el inversor podría sobrecargarse y apagarse automáticamente para evitar daños.

Es importante elegir un inversor con una capacidad de watts suficiente para la carga eléctrica que se necesita alimentar. Si se necesita alimentar varios dispositivos eléctricos al mismo tiempo, se debe buscar un inversor con una mayor capacidad de watts. Por otro lado, si solo se necesita alimentar un dispositivo de baja potencia, se podría utilizar un inversor con una menor capacidad de watts para ahorrar en costos. La capacidad de watts es un factor importante para considerar al elegir un inversor de corriente, ya que influye en la cantidad de carga eléctrica que se puede alimentar y en la cantidad de dispositivos eléctricos que se pueden usar al mismo tiempo.

La fórmula para calcular los watts depende de los valores de voltaje (V) y corriente (I) que están siendo suministrados. La fórmula básica es:

$$W = V \times I$$

Donde:

W es la potencia eléctrica en watts (W) V es el voltaje en voltios (V) I es la corriente en amperios (A)

Esta fórmula se conoce como la ley de Ohm para la potencia eléctrica y se utiliza para calcular la cantidad de watts que se están suministrando en un circuito eléctrico.



Por ejemplo, si se tiene un dispositivo que funciona con 12 voltios y una corriente de 5 amperios, la potencia eléctrica sería:  $W = 12 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 60 \text{ watts}$

Por lo tanto, este dispositivo estaría consumiendo 60 watts de energía eléctrica. Es importante tener en cuenta que la capacidad de watts del inversor que se utilice para alimentar este dispositivo debe ser mayor o igual a 60 watts para poder funcionar correctamente.

En este caso específico hemos recurrido a utilizar un inversor de corriente de onda sinusoidal para la instalación de la alfombra recolectora de energía mediante piezoeléctricos, se utilizó un inversor de corriente que otorga una potencia de 500W y trabaja en rangos de voltaje de entrada de 12V / 24V DC y en su rango de salida otorga una corriente alterna de 120V / 220V AC.

#### *V-Q. Batería de almacenamiento recargable de composición química*

Una batería química de almacenamiento, también conocida como batería de almacenamiento, es un dispositivo que convierte la energía química en energía eléctrica y la almacena para su uso posterior. Esencialmente, una batería de almacenamiento es una solución de almacenamiento de energía que se puede cargar y descargar en función de las necesidades energéticas [9].

Las baterías químicas de almacenamiento se componen de celdas electroquímicas, que contienen electrolitos, ánodos y cátodos. Cuando se carga la batería, se aplica una corriente eléctrica al ánodo, que libera electrones. Los electrones fluyen a través del circuito externo para cargar el cátodo. Durante la descarga, los electrones fluyen en la dirección opuesta, desde el cátodo hacia el ánodo, produciendo energía eléctrica.

Existen varios tipos de baterías químicas de almacenamiento, incluyendo las baterías de plomo-ácido, las baterías de iones de litio, las baterías de níquel-cadmio y las baterías de flujo. Cada tipo tiene sus propias características, incluyendo su capacidad de almacenamiento, eficiencia energética y costos [18].

Las baterías químicas de almacenamiento se utilizan para una amplia variedad de aplicaciones, desde sistemas de respaldo de energía para hogares y edificios, hasta sistemas de almacenamiento de energía para energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas. Estas baterías también se utilizan en vehículos eléctricos, sistemas de telecomunicaciones y dispositivos portátiles como teléfonos móviles y computadoras portátiles [21].

En el caso de la batería utilizada para la instalación de la alfombra recolectora de energía mediante piezoeléctricos, se utilizó una batería first power con las características nombradas, cuyo voltaje es de 12V y 7.5Ah la cual a su vez es la fuente de almacenamiento, de la energía que producirá la alfombra piezoeléctrica.

Una batería de 12V y 7.5Ah significa que la batería tiene una capacidad de almacenamiento de energía de 7.5 Amperios-hora (Ah) y una tensión nominal de 12 voltios (V). La capacidad de la batería indica la cantidad de energía eléctrica que puede suministrar a un dispositivo durante un período de tiempo determinado. En este caso, la batería puede suministrar una corriente de 7.5 amperios durante una hora, o una corriente de 1 amperio durante 7.5 horas.

La capacidad de la batería también puede expresarse en términos de vatios-hora (Wh), que es la cantidad de energía que puede suministrar la batería durante una hora a una determinada carga. Para calcular los vatios-hora de la batería de 12V y 7.5Ah, se multiplica la capacidad en Ah por la tensión nominal en V, lo que da como resultado 90 vatios-hora (Wh).

Esta batería de 12V y 7.5Ah conectada a un inversor de 500W, la duración del tiempo que puede suministrar energía dependerá de varios factores, como la eficiencia del inversor que se utilizará, 500watts, la carga que esté conectada al inversor y la tasa de descarga de la batería. Para calcular el tiempo de duración aproximado que la batería puede suministrar energía, se puede utilizar la siguiente fórmula:

Tiempo de duración = Capacidad de la batería / (Potencia de carga / Tensión de la batería)

En este caso, la capacidad de la batería es de 7.5 Ah y la potencia de carga es de 500W. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la potencia de carga no debe exceder la capacidad de descarga de la batería, que se puede calcular dividiendo la capacidad de la batería por un factor de seguridad de alrededor del 0.6 para evitar daños a la batería. En este caso, la capacidad de descarga sería de aproximadamente 12.5A (7.5Ah/0.6).

Ahora se asume que la batería se conecta a un dispositivo cuyo consumo es de 500W hora, lo cual es la capacidad producida por el inversor conectada a la alfombra piezoeléctrica. Para calcular el tiempo de duración de la batería,

necesitamos conocer la fórmula:  $\text{Tiempo de duración} = \text{Capacidad de la batería} / (\text{Potencia de carga} / \text{Tensión de la batería})$

En este caso, la capacidad de la batería es de 7.5Ah (Amperios-hora) y la tensión de la batería es de 12V. La potencia de carga es de 500W. Entonces, sustituyendo en la fórmula:  $\text{Tiempo de duración} = 7.5\text{Ah} / (500\text{W} / 12\text{V})$   
 $\text{Tiempo de duración} = 0.18$  horas

El resultado indica que la batería durará aproximadamente 0.18 horas, es decir, 10.8 minutos, alimentando un dispositivo que consume 500W a través del inversor. Sin embargo, esta es solo una estimación y el tiempo real de duración puede variar dependiendo de factores como la eficiencia del inversor y la carga real conectada.

#### *V-R. Regulador de carga*

Un regulador de carga es un componente esencial en los sistemas de energía renovables. Su función principal es proteger la batería de sobrecarga y descarga excesiva, así como de corrientes inversas que pudieran producirse. Además, permite controlar la carga y descarga de la batería para maximizar su vida útil y optimizar la eficiencia del sistema.

El regulador de carga funciona monitoreando la tensión de la batería y ajustando la carga obtenida de la alfombra piezoeléctrica en consecuencia. Cuando la batería está completamente cargada, el regulador de carga desconectará la alfombra piezoeléctrica para evitar la sobrecarga de la batería. Cuando la carga de la batería disminuye, el regulador de carga conecta la alfombra piezoeléctrica para de esta manera poder cargar la batería nuevamente [25]. Además, algunos reguladores de carga también pueden proporcionar información de rendimiento y monitoreo remoto del sistema.

La estructura electrónica y eléctrica de un regulador de carga generalmente incluye un microcontrolador, sensores de corriente y tensión, un circuito de conmutación, un relé de desconexión, y otros componentes electrónicos para la protección de sobrecarga y descarga. Algunos reguladores de carga también pueden tener pantallas LCD o LED para mostrar el estado del sistema y las mediciones de corriente y tensión.

La función primordial de un regulador de carga es proteger la batería de sobrecarga y descarga excesiva. La sobrecarga de la batería puede reducir su vida útil y dañar los componentes del sistema. Por otro lado, la descarga excesiva de la batería puede dañar la batería y reducir su capacidad de carga. Además, el regulador de carga también ayuda a maximizar la eficiencia del sistema, controlando la carga y descarga de la batería para evitar la pérdida de energía [14].

En este caso en particular se está utilizando un controlador de carga que permitirá realizar todos los procesos descritos anteriormente en este punto, el controlador utilizado en la alfombra recolectora de energía es un W88-C cuyas características principales son:

1. Carga de corriente: 1A / 30A 2. Descarga de corriente: 1A / 10A 3. Entrada de voltaje: 12V / 24V 4. Carga de mantenimiento: 14.4V 5. Tope de descarga: 10.7V 6. Reconectar la descarga: 12.6V 7. Reconectar la carga: 13.2V 8. Salidas USB: 5V / 2.5A 9. Temperatura de operación:  $-35^{\circ}$  +  $60^{\circ}$  10. Potencia máxima de manejo: 780W Se tiene un regulador de carga de 780W y 12V de entrada, significa que puede manejar una corriente máxima de 65 amperios ( $780\text{W} / 12\text{V} = 65\text{A}$ ). Por otro lado, se tiene una batería de 12V y 7.5Ah, significa que puede suministrar una corriente de 7.5 amperios durante una hora a una carga constante de 12V.

Al conectar el regulador de carga a la batería y el inversor de 500W, el regulador de carga se encargará de asegurar que la batería se cargue correctamente y se mantenga a una carga óptima para su uso en el inversor. El regulador controla la cantidad de energía que entra y sale de la batería para asegurarse de que no se sobrecargue o se descargue demasiado.

En términos de tiempo de funcionamiento, si la batería está completamente cargada y se usa en un inversor de 500W, la duración dependerá de varios factores, como la eficiencia del inversor y la carga que se esté alimentando. Si suponemos una eficiencia del inversor del 90% y una carga de 400W, la duración aproximada de la batería sería de 1.5 horas ( $7.5\text{Ah} / (400\text{W} / 12\text{V}) / 0.9 = 1.5$  horas).

Es decir que el regulador de carga es un dispositivo importante para asegurar la carga óptima y la protección de la batería al utilizarla en combinación con un inversor de corriente. La capacidad de tiempo de funcionamiento dependerá de varios factores, incluida la eficiencia del inversor y la carga utilizada.

## V-S. Luces LED

Las luces de tira LED son un tipo de iluminación que consiste en una serie de LED montados en una tira flexible. Estas luces se han vuelto muy populares en los últimos años debido a su bajo consumo de energía, larga duración, facilidad de instalación y la capacidad de crear efectos de iluminación personalizados.

Las tiras LED funcionan mediante el uso de diodos emisores de luz (LED), que son dispositivos electrónicos semiconductores que emiten luz cuando una corriente eléctrica pasa a través de ellos. Los LED tienen un consumo de energía muy bajo, lo que los hace mucho más eficientes que las bombillas tradicionales y permiten que las tiras LED duren más tiempo. Las luces de tira LED se pueden utilizar en una amplia variedad de aplicaciones. Por ejemplo, se pueden utilizar para iluminar un armario, un estante o una vitrina. También se pueden utilizar para crear un ambiente especial en una habitación o espacio. Las tiras LED son muy populares en la decoración de interiores y exteriores, en la iluminación de vehículos y en la iluminación de espectáculos. La duración de las luces de tira LED depende de varios factores, como la calidad de los componentes, la frecuencia de uso, la temperatura y la corriente eléctrica que se les suministra. En general, los LED tienen una vida útil de aproximadamente 50.000 horas, lo que significa que pueden durar muchos años si se utilizan correctamente. Además, como las tiras LED no contienen filamentos o componentes mecánicos móviles, son más resistentes a las vibraciones y a los golpes que las bombillas tradicionales.

Las tiras LED están disponibles en una variedad de longitudes, colores y brillos, lo que las hace muy versátiles. Algunas tiras LED tienen la capacidad de cambiar de color y producir efectos de iluminación especiales, lo que las hace ideales para la creación de ambientes personalizados. Las tiras LED también se pueden cortar en longitudes más cortas para adaptarse a espacios más pequeños o para ajustar la longitud de la tira a un tamaño específico.

Los LED SMD 2835 y 3528 son dos tipos de diodos emisores de luz (LED) de montaje superficial (SMD) que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones de iluminación.

La principal diferencia entre los LED SMD 2835 y 3528 es el tamaño. Los LED SMD 2835 son ligeramente más grandes que los 3528, con unas dimensiones de 2,8 mm x 3,5 mm en comparación con los 3,5 mm x 2,8 mm de los 3528.

Esta diferencia de tamaño se traduce en diferentes características de rendimiento de los LED. En general, los LED SMD 2835 son más brillantes y eficientes energéticamente que los 3528. Esto se debe en parte a su tamaño más grande, que les permite alojar chips LED más grandes y potentes.

Además, los LED SMD 2835 suelen tener una disposición de dos chips LED en serie, lo que les permite producir más luz con menos energía. Por otro lado, los LED SMD 3528 suelen tener una disposición de un solo chip LED, lo que significa que producen menos luz, pero también consumen menos energía.

Si se busca una mayor eficiencia energética y brillo, los LED SMD 2835 pueden ser una mejor opción que los 3528. Sin embargo, si se necesita una iluminación más sutil y se desea ahorrar en el consumo de energía, los LED SMD 3528 pueden ser la mejor opción.

## VI. MARCO METODOLÓGICO

En la siguiente sección a tratar, se lleva a cabo una serie de pasos a manera de guía de construcción de la alfombra recolectoría de energía.

Como consecuencia de los principios teóricos aportados en las secciones anteriores, se pretende dar a conocer el esfuerzo que se realiza en cada proceso de implementación de nuestro prototipo en el diseño y construcción de un generador piezoeléctrico, ejemplificado en la alfombra.

### VI-A. Características técnicas calculadas y obtenidas del sensor piezoeléctrico

- Frecuencia de resonancia (KHz)  $3.0 \pm 0.3$
- Impedancia resonante(O) =500
- Capacitancia a 1KHz(pF)  $25000 \pm 30$
- Diámetro de la placa de metal (mm) (D) (mm)  $f35.0 \pm 0.1$
- Diámetro de la placa de cerámica (mm) (d) (mm)  $f24.0 \pm 0.2$
- Espesor total (mm) (T) (mm)  $0.35 \pm 0.05$
- Espesor de la placa de metal (mm) (t) (mm)  $0.15 \pm 0.05$

### VI-B. Funcionamiento Mecánico

Un generador piezoeléctrico tiene como función principal transformar la energía mecánica en energía eléctrica, dicho proceso es posible gracias a la deformación de su material principal el cual al deformarse produce energía eléctrica aprovechada para dar origen a nuestro prototipo.

La alfombra piezoeléctrica consta de una estructura de alfombra inerte, la cual al ser pisada o aplastado por un peso externo, esta comienza a producir energía eléctrica. Lo notable de esta alfombra piezoeléctrica es la capacidad que tiene de producir energía mediante un conjunto de discos piezoeléctricos conectados en paralelo uno a uno.

La implementación de esta tecnología basada en el efecto piezoeléctrico se piensa aplicar en lugares recurrentes de tráfico peatonal o en los interiores de oficinas o aulas de estudios. Y esto se debe a que debemos considerar varios factores al momento de su aplicación, ya que se plantea que esta transformación de energía sea inducida mediante la fuerza obtenida de una pisada humana.

### VI-C. Aplicación de matemáticas a los parámetros eléctricos

El presente trabajo presenta bases matemáticas correspondientes a los valores de tensión generada, la cual será calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$V = - \left( G_{33} * h * \frac{f}{A} \right) \quad (1)$$

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

La ecuación otorgada define la tensión que puede generar una carga mecánica que actúa sobre un área determinada de un dispositivo piezoeléctrico, donde:

V= tensión de pico esperado por la deformación del material (V)

G33= constante piezoeléctrica (Vm/N)

H= longitud o grosor del piezoeléctrico (mm)

F= fuerza que se le imprime al cerámico piezoeléctrico.

D= diámetro del cerámico piezoeléctrico

A= área del piezoeléctrico en metros cuadrados (la fuerza aplicada sobre esta área se denomina el nivel de estrés que sufre el material piezoeléctrico)

En este caso, esta fórmula será aplicada a nuestro piezoeléctrico de 35mm de diámetro en la parte del diafragma y 24mm de diámetro en el cerámico o parte interna, la constante piezoeléctrica es del orden de 0.025. Estas especificaciones, excepto por la constante piezoeléctrica, fueron tomadas de acuerdo al siguiente gráfico:

Dimensions		Example Picture
1	D External Diameter	35mm±0.1mm
2	d Inside Diameter	24mm±0.2mm
3	T Thickness	0.15mm±0.05mm
4	T Thickness	0.35mm±0.05mm

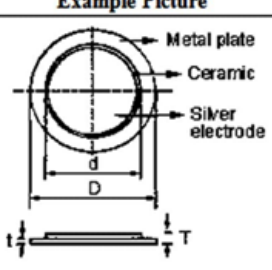


Figura 14. Especificaciones geométricas del dispositivo piezoeléctrico utilizado.

#### VI-D. Intensidad de la corriente

Al tener conectados los piezoeléctricos en paralelo conseguiremos conservar una tensión de salida igual, independientemente de la cantidad de dispositivos que se encuentren conectados. Sin embargo la corriente puede variar dependiendo de la cantidad de dispositivos piezoeléctricos conectados, además de la impedancia que estos presentan.

Por la naturaleza de los dispositivos piezoeléctricos estos presentan una elevada impedancia muy cercana a 400 ohmios, pareciera que no es una cantidad considerable pero debido a las características del material, esta se considera una resistencia muy elevada.

Los valores obtenidos varían en valores de miliamperios, para el caso de estos piezoeléctricos considerados dispositivos cerámicos se considera que tendrán una corriente de base de un orden de 1mA, como número de referencia.

#### VI-E. Potencia producida por el dispositivo piezoeléctrico

La potencia que producirá el piezoeléctrico a partir de ser accionada por la pisada humana se definirá como un producto, producto de una tensión de salida por una intensidad de corriente, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = V * I \quad (3)$$

Siendo:

$P$  = Potencia en (W)

$V$  = Voltaje (V)

$I$  = Intensidad de corriente (A)

#### VI-F. Fuerzas aplicada a los discos piezoeléctricos

Para poder calcular la fuerza que se va a ejercer sobre los piezoeléctricos se utilizará la siguiente ecuación  $F = m * g$  Donde los valores de la fuerza aplicada se toman estimando el peso promedio de la población a nivel mundial lo cual sería 80 kg, y la fuerza de gravedad considerada sería  $9,81m/s^2$

Operando, se tiene como resultado:

$$F = m * g \quad (4)$$

$$F = 80kg * 9,8 \frac{m}{s^2} \quad (5)$$

$$F = 784,8N \quad (6)$$

#### VI-G. Área de contacto en el disco piezoeléctrico

El área de contacto con el disco piezoeléctrico es el área donde se concentra el material cerámico que entra en contacto con la fuerza mecánica aplicada. Ésta es el área del cristal de cuarzo, y para poder calcular el área de contacto respecto al diámetro del disco, utilizamos la siguiente ecuación:

$$A = \frac{A_p^2 * AC * \pi}{4} \quad (7)$$

Donde:

$A_p$  = Área de acción del disco.

$\pi$  = 3.1416 (valor constante)

$AC$  = Área del piezoeléctrico en metros cuadrados (24mm)

#### VI-H. Cálculo de tensión por unidad de piezoeléctrico

Para poder calcular la tensión generada por los dispositivos piezoeléctricos, se utiliza la siguiente Ecuación (2), previamente mostrada, para el cálculo de tensión.

A su vez, los siguientes datos del material piezoeléctrico serán necesarios para reemplazar los valores de las variables de la ecuación, dados en la siguiente tabla:

Tabla I  
VARIABLES NECESARIAS PARA RESOLVER LA ECUACIÓN (2) Y SUS MAGNITUDES

Variable	Magnitud
Constante piezoeléctrica (G33)	0.025
Grosor del piezoeléctrico (h)	0.35mm
Fuerza aplicada al piezoeléctrico (F)	748N
Área de contacto del piezoeléctrico	20mm

Con los datos obtenidos mostrados, se calcula la tensión por unidad que genera cada dispositivo piezoeléctrico utilizado en nuestro prototipo, de la siguiente manera:

$$V = \left( 0,025 * 0,00035m * \frac{748N}{0,02m^{2+\frac{\pi}{4}}} \right) \quad (8)$$

$$V = 21,83V \quad (9)$$

#### VI-I. Tensión generada por un impulso en un único dispositivo piezoeléctrico

La tensión que genera el dispositivo piezoeléctrico varía entre los 1.5V y 37.2V por cada piezoeléctrico, estos valores se obtuvieron conectando el multímetro independientemente a un solo disco piezoeléctrico, el cual a su vez se le ejerció una fuerza mecánica capaz de deformarlo y este pueda producir energía, se adjunta una imagen de lo mencionado.

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

Figura 15. Lectura de tensiones generadas por el dispositivo piezoeléctrico.

#### VI-J. Medición generada por pesos específicos en un dispositivo piezoeléctrico

A continuación se muestra una tabla de valores en la cual se define el nivel de tensión que puede generar el dispositivo piezoeléctrico sometido a ciertos pesos en específico.

Se observa que los valores que se obtienen en la siguiente tabla, son basados en la aplicación del peso específico de un usuario, es decir que los valores de voltaje varían según el peso de la pisada aplicada sobre los dispositivos piezoeléctricos.

Tabla II  
MEDICIONES GENERADAS EN EL DISPOSITIVO PIEZOELÉCTRICO POR DISTINTOS PESOS

Pruebas	Disco 1(V)	Disco 2(V)	Disco 3(V)	Disco 4(V)
Peso (17kg)	11.13V	9.26V	10.84V	11.75V
Peso (68kg)	27.54V	29.63V	27.25V	34.13V
Peso (74kg)	27.56V	28.21V	29.61V	27.19V
Peso (85kg)	30.14V	32.72V	30.21V	31.75V
Peso (92kg)	35.36V	35.20V	36.17V	37.06V

Se aprecia en la tabla de pesos variados, existen diferentes escalas de voltaje obtenidos las cuales varían según el peso de la persona, y según la posición en que se coloque el tarugo de impresión 3D, produciendo así mediciones

variadas en su voltaje, las cuales al momento de la instalación del sistema electrónico deberán ser rectificadas para tener una salida de corriente fija.

Se observa también que a mayor peso aplicado sobre los dispositivos piezoeléctricos, mayor será la medida de tensión obtenida por parte de este, De este modo, se obtienen voltajes diferentes y de mayor magnitud.

#### VI-K. Construcción de la alfombra piezoeléctrica

La construcción, ensamble e implementación del recolector de energía mediante Energy Harvesting será lo que denominamos alfombra piezoeléctrica, es decir que el ensamble total de nuestro prototipo radica en el funcionamiento y operación de todas las partes en conjunto, funcionando de manera óptima.

La alfombra piezoeléctrica se encuentra conformada por un total de 60 dispositivos piezoeléctricos conectados en paralelo uno a uno.

La construcción de la alfombra comprende de lo que se ha seleccionado como base para el asentamiento de estas, la adhesión de cada uno de los dispositivos a la base, la protección de los dispositivos en la base, la interconexión a realizarse de estos y también el método de protección de la misma.

*VI-K1. Construcción de la base de alfombra piezoeléctrica:* La base de la alfombra piezoeléctrica por exigencias propias del proyecto debe ser un material que posee una resistencia mecánica favorable y maniobrable al momento de la instalación debido a que el prototipo se presenta como alfombra esta se encuentra expuesta a una alta cantidad de deformaciones mecánicas.

Esta alfombra tiene como base, una plancha de Plywood de 45cm de ancho por 75 cm de largo y un grosor de 18mm, se trata de un tablero de espesor considerable el cual debido a pruebas fue considerado como el más apto para la creación del prototipo, debido a que otros tableros de menos espesor eran muy frágiles y fácil de romperse con el peso de una persona de 92kg.



Figura 16. Plancha de Plywood a utilizarse, medidas (45x75x18).

*VI-K2. Asentamientos individuales para cada dispositivo piezoeléctrico:* Para la ubicación de cada dispositivo piezoeléctrico se realizó la fabricación de una pieza de asentamiento a la cual hemos denominado como anillos, estos anillos serán esenciales en el momento de la instalación de los discos piezoeléctricos pues permitirán que estos no se muevan de su lugar ubicado y además les permite crear la deformación que necesita el cristal de cuarzo para poder realizar el proceso de transformación de energía mecánica a eléctrica, debido a que no se consideró factible pegarlos directamente a la placa base de Plywood puesto que no existiría la deformación del cristal de cuarzo, por ende se procedió a la fabricación de estos anillos de colores impresos en PLA con una impresora 3D.



Figura 17. Asentamientos de PLA para fijar los discos piezoeléctricos a la base.

*VI-K3. Adhesión de los dispositivos piezoeléctricos a la base:* En la figura anterior, se observa que los dispositivos piezoeléctricos están adheridos a la base de Plywood mediante los denominados anillos en PLA, los cuales a su vez están adheridos a la base por cianocrilato de metilo o super glue, y esto se debe a que el cianocrilato es una resina que en presencia de agua se polimeriza dando origen a cadenas muy fuertes y largas que mantienen aquellas superficies unidas entre sí. Gracias a ello, no se necesita ejercer presión ni ejercer calor para que estos se puedan adherir a la base, y es gracias al cianocrilato que podemos conseguir una fuerte adhesión de los anillos con la base del prototipo de la alfombra piezoeléctrica.



Figura 18. Adhesión de los anillos y los dispositivos piezoeléctricos a la base de Plywood.

*VI-K4. Interconexión de los dispositivos piezoeléctricos:* Sobre la base de Plywood, se aprecia que los dispositivos piezoeléctricos se encuentran conectados de manera paralela, es decir los polos positivos (+) están todos conectados entre sí, y a su vez lo mismo con los polos negativos (-). Éste es el método de conexión en paralelo el cual se consideró como método de conexión del prototipo debido a que la alfombra piezoeléctrica deberá cumplir con la función de generar impulsos eléctricos que puedan ser almacenados en una batería la cual a su vez mediante un inversor será utilizada para suministrarse a equipos eléctricos y reducir el consumo de energía eléctrica.



La interconexión de los dispositivos piezoeléctricos realizada en paralelo se hizo en hileras de 6 por 10 filas, obteniendo así un total de 60 dispositivos piezoeléctricos conectados entre sí y distribuidos de manera aleatoria.

*VI-K5. Protección mecánica de los dispositivos piezoeléctricos:* La protección mecánica de los dispositivos piezoeléctricos instalados en la alfombra recolectora de energía mecánica, se basa en un sistema de muelles y amortiguación mediante el uso de resortes que permitirán que la parte superior de la alfombra baj. A su vez con ayuda de unos tarugos impresos en TPU estos presionan los dispositivos piezoeléctricos produciendo así la deformación mecánica de los mismos, obteniendo así una plataforma de suspensión que retomara su posición original. Además, puede bajar hasta un tope definido y no romper los dispositivos piezoeléctricos cuando se exponen a una fuerza mecánica externa.

*VI-L. Diseño e implementación de piezas para la construcción de la alfombra, por medio de impresión 3D*

*VI-L1. Tarugos impresos en 3D y su función en el modelo de alfombra:* El software utilizado para la creación del modelo fue Tinkercad y el software para el proceso de impresión fue Ultimaker Cura. Gracias a este software de modelado en 3D, fue posible crear un tarugo cuya función específica será pulsar el dispositivo piezoeléctrico logrando así que este se pueda deformar en la mayor área posible y a su vez pueda producir energía eléctrica.

Las características principales de este elemento son; impreso en TPU flexible un material cuyas características flexibles permitirá que el impacto con el cristal de cuarzo del piezoeléctrico no sea tan rígido.

Las medidas de este tarugo y sus características de relleno son; medidas 20x20x37mm medidas en (X,Y,Z) estas medidas se tomaron en consideración con el área de contacto con el disco piezoeléctrico las cuales serán pulsadas por el tarugo impreso en el área del cristal de cuarzo tienen una densidad de relleno del 30 %, este porcentaje de relleno se consideró para que la pieza no sea solida al 100 % ni tan frágil al momento de ser utilizada. En total se imprimieron la cantidad de 60 tarugos, es decir 1 tarugo por cada dispositivo piezoeléctrico.

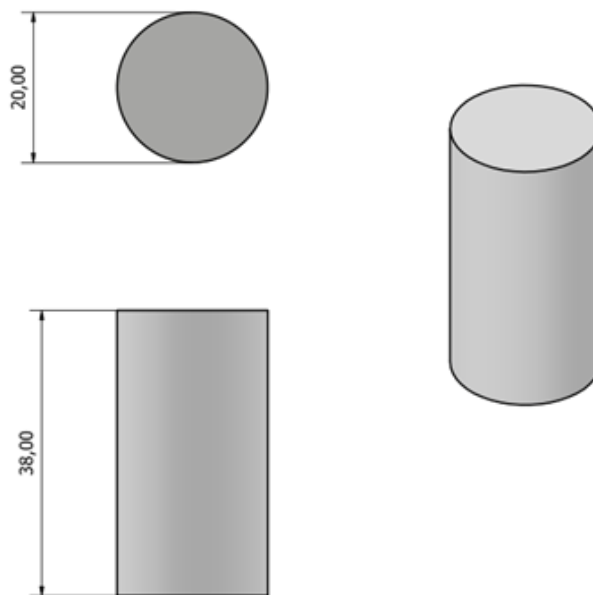


Figura 19. Plano de dibujo de los tarugos.

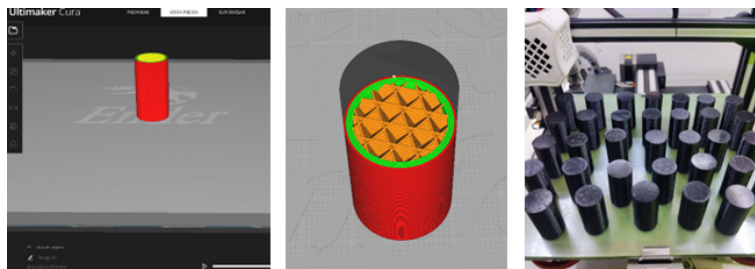


Figura 20. Tarugos impresos en 3D y su diseño interior.

*VI-L2. Anillos de guía para los dispositivos piezoeléctricos:* El software utilizado para la creación del modelo fue Tinkercad y el software para el proceso de impresión fue Ultimase Cura, gracias a este software de modelado en 3D fue posible crear los anillos de guía para los discos piezoeléctricos los cuales a su vez como su nombre lo indica, sirven de guía para mantener los discos adheridos a la base de la alfombra, y estos a su vez puedan tener un orden en su ubicación y se mantengan estables para que cuando se movilice la alfombra de un lugar a otro sus discos piezoeléctricos no se suelten.

Las características principales de este elemento son: impreso en PLA de alta temperatura y rigidez, dicho anillo permitirá mantener en su lugar la posición del dispositivo piezoeléctrico y gracias a sus características de ser un derivado del plástico, este es muy bueno adhiriéndose entre el cianocrilato de metilo y la base de la alfombra permitiéndonos así mantener fijos los discos piezoeléctricos.

Las medidas de los discos son: 45mm en el diámetro exterior y 30mm en el diámetro interno, el corte frontal es de 20mm y el diámetro interno para encaje del piezoeléctrico es de 35.10mm, la altura de ésta pieza es de 4mm.

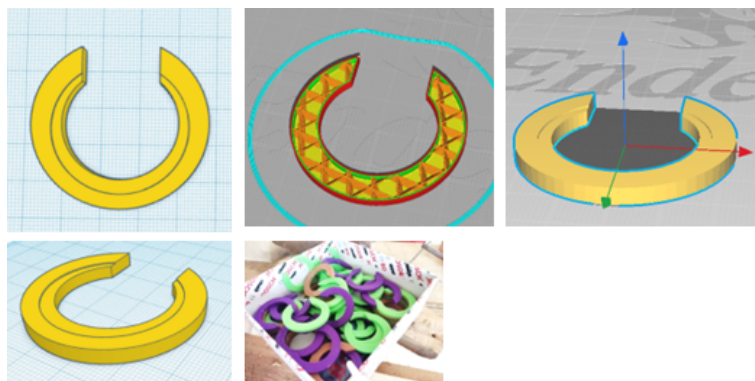


Figura 21. Modelado de discos de protección de los dispositivos piezoeléctricos.

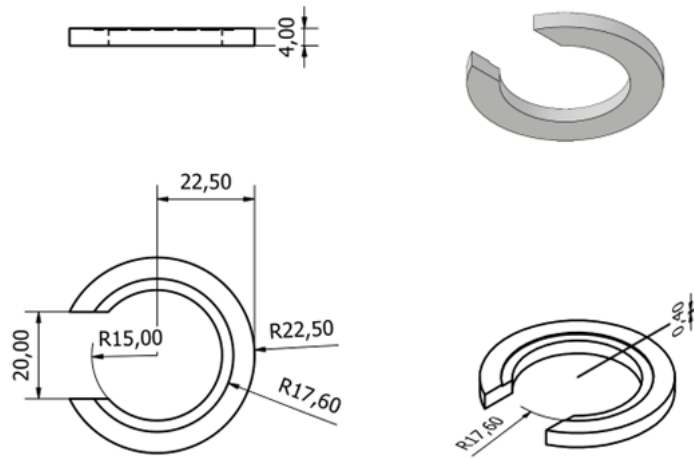


Figura 22. Plano de dibujo de los discos protectores de los elementos piezoeléctricos.

VI-L3. *Ensamblaje de alfombra:* El conjunto de elementos nombrados y descritos, permiten realizar la fabricación del producto final y poder exhibirlo de manera terminada y funcional.

Para la creación y ensamble de la alfombra piezoeléctrica se utilizó como base un tablero de Plywood de 18mm y como tapa se utilizó otro con iguales características. En el tablero base se insertaron los dispositivos piezoeléctricos adheridos con sus respectivos anillos guía. Estos fueron adheridos mediante el cianocrilato de metilo el cual permitió que estos queden fijados de manera casi permanente a la base.

Además de que estos permiten organizar la ubicación de los discos piezoeléctricos en columnas de 6 unidades por 10 filas, dando un total de 60 dispositivos agregados y ordenados de manera secuencial uno a uno tal como se observa en la siguiente imagen:

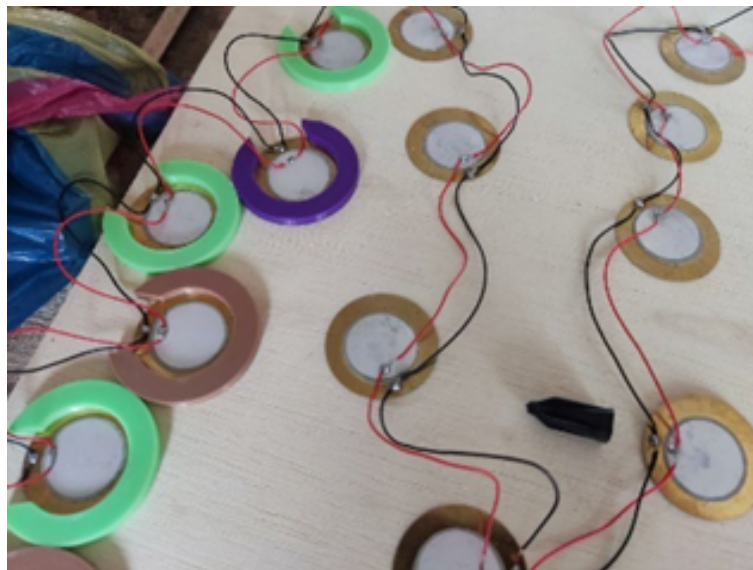


Figura 23. Discos piezoeléctricos conectados entre sí en secuencia.

Posterior a la ubicación y adhesión de estos, se procede a soldar en paralelo los respectivos contactos en grupos de 2 filas y luego se los une mediante una conexión en serie dando como resultado una conexión serie paralelo de dispositivos piezoeléctricos.

Luego de tener soldados y alineados todos los discos piezoeléctricos, se procede a presentar la tapa superior de

la alfombra, misma que será la encargada de receptor el esfuerzo mecánico que se ejercerá sobre esta y obteniendo como tal la deformación de los cristales de cuarzo que dan como origen la energía eléctrica.

Subsecuentemente, se toman las medidas y las posiciones de los discos piezoeléctricos. Se realiza un total de 9 agujeros en ambos tableros de Plywood con el propósito de que puedan pasar pernos de ½ pulgada y estos a su vez sirvan de guía de amortiguación de los resortes que se van a instalar tal como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 24. Resortes para amortiguar el impacto durante el contacto del usuario con la alfombra.

Una vez adaptadas las dos bases de la alfombra y realizados los respectivos agujeros para el ingreso de los pernos acerados, se coloca el muelle o resorte que servirá de amortiguación para que la tapa posterior de la alfombra no mantenga presionado los discos piezoeléctricos y vuelva a su posición cada que alguien deje de pisar la alfombra evitando así que los cristales de cuarzo del disco piezoeléctrico se vean comprometido con una futura ruptura, la ubicación de los pernos y sus resortes es esencial para que la alfombra se mantenga fija y amortiguada cada que una pisada humana sea puesta sobre ella.

Posterior a ello, se procede a la instalación y adhesión de los tarugos impresos en 3D, los cuales permitirán dar origen al esfuerzo mecánico que producirá energía eléctrica. Estos tarugos van adheridos a la tabla posterior de la alfombra, la cual cumplirá la función de tapa del prototipo, tal como se ve en la siguiente imagen:

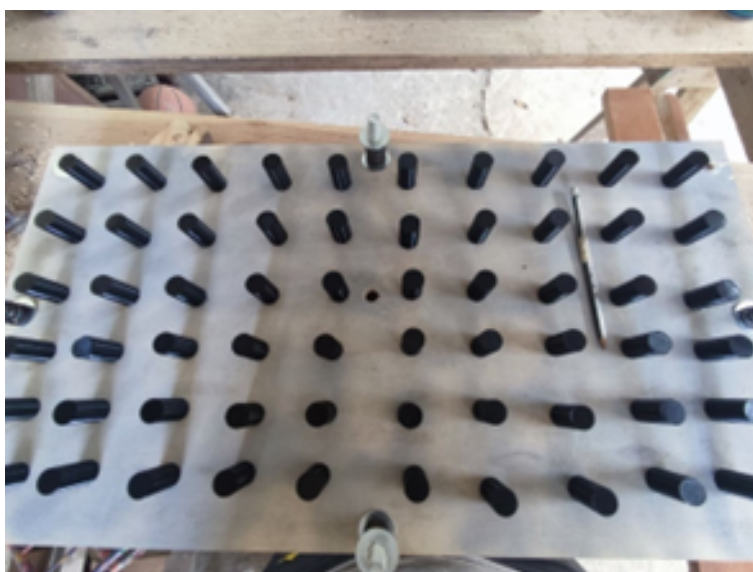


Figura 25. Tarugos instalados a la tapa posterior de la alfombra.

Llevando sobre ella la adhesión de la alfombra mediante velcro o cinta mágica de costurera, tal como se muestra en la imagen siguiente:

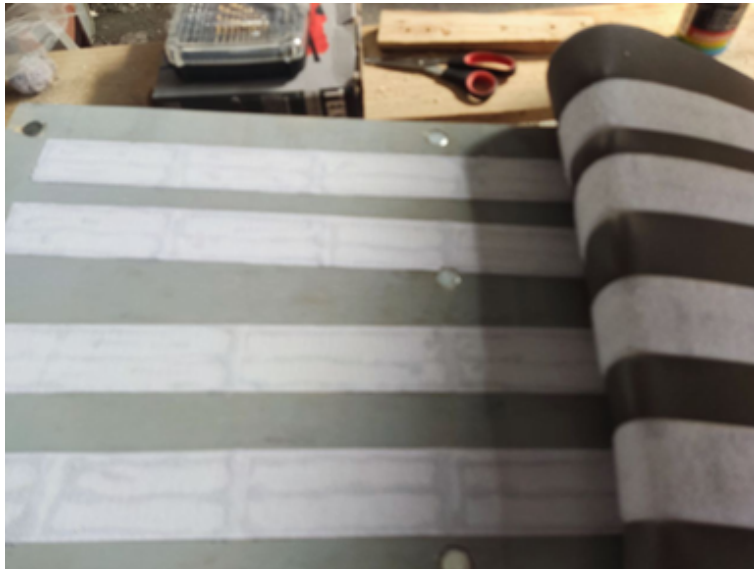


Figura 26. Velcro adherido por sobre la tapa posterior de la alfombra.

#### VI-M. Medidas y cálculos del muelle utilizado

El muelle o resorte utilizado fue un resorte de 36mm de alto por un diámetro del muelle de 22mm, con un diámetro de alambre de 3mm, un paso de 4mm y un ángulo de la espira de 45°.

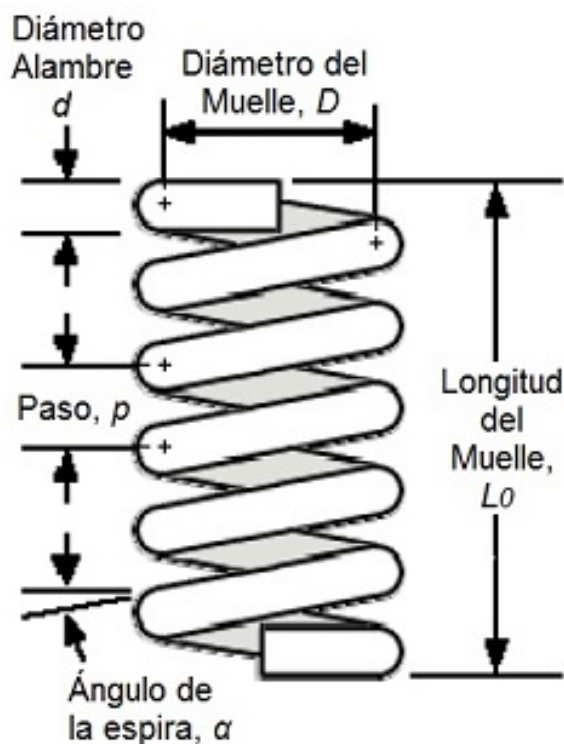


Figura 27. Referencia de dimensiones para selección de resorte a utilizarse.

La selección de este muelle o resorte se decidió debido a la cantidad de carga que estos pueden soportar. Un solo muelle se comprime en su totalidad cuando este tiene sobre él un peso de 50kg, es decir, que si utilizamos una

cantidad de 9 muelles o resortes conseguiremos que la cantidad de retracción que tendrá cada uno de estos muelles sea mínima y por ende conseguiremos que los muelles al no disminuir tanto su altura estos podrán presionar con exactitud el cristal de cuarzo de los dispositivos piezoeléctrico. De esta manera, se obtiene un espacio libre de pulsar los piezoeléctricos mientras la alfombra no está en uso y obteniendo también el nivel de presión adecuados cuando están siendo presionados por una fuerza o externa.

Los resortes o muelles ubicados en la parte superior de la baldosa piezoeléctrica son esenciales en este prototipo debido a que su operación se basa en hacer que la parte donde se visualiza la alfombra es decir la parte superior, regrese a su posición original, lo que permite que la alfombra esté preparada para la próxima pisada de un peatón.

#### VI-N. Conexión de los piezoeléctricos y selección de la mejor opción

VI-N1. *Conexiones en Paralelo, Serie y Mixto:* En este tipo de conexión se espera poder realizar la toma de datos de los dispositivos piezoeléctricos correspondiente a las conexiones indicadas y así obtendremos distintos valores otorgados y al finalizar se tomarán los datos en una tabla donde compararemos cuál de las conexiones ya sea, paralelo, en serie o mixta, nos resultará mejor para el proceso de obtención de energía de la alfombra.

VI-N2. *Tipo de Conexión usado:* El circuito eléctrico utilizado para generar energía eléctrica a partir de la baldosa cuenta con tres tipos de conexiones: una conexión en serie de cuatro piezoeléctricos, una conexión en paralelo de cuatro piezoeléctricos y una conexión mixta que consta de dos piezoeléctricos en serie y dos en paralelo. Se miden los valores de voltaje de cada una de estas conexiones y se calcula la potencia generada por el sistema.

Tabla III  
MEDICIONES GENERADAS EN EL DISPOSITIVO PIEZOELÉCTRICO POR DISTINTOS PESOS

Conexión en Paralelo	Conexión en Serie	Conexión en Mixto	Peso de la persona
26V	36V	11V	68g
29V	41V	26V	92kg
29V	38V	19V	74kg
27V	39V	25V	85kg

Para la obtención de los siguientes datos se utilizó la fórmula de  $P = V.I$  conectando un multímetro digital en serie lo cual nos permitió obtener los valores de la siguiente tabla. Se lo realizo específicamente en la toma de datos de do shileras de piezoeléctricos.

Estos valores serían los denominados picos de corriente en el momento de que una pisada humana se efectúa sobre los sensores y son las cantidades que se obtuvieron según el peso de las personas y la posición en la que fue pisada la alfombra. Se debe tomar en cuenta que la alfombra en sí no recolectó la pulsación de todos los piezoeléctricos sino más bien sólo los del área que fue pulsada por el peatón. Es decir, los que se vieron afectados por el peso de las personas en dicho momento.

Tabla IV  
MEDICIONES GENERADAS EN EL DISPOSITIVO PIEZOELÉCTRICO POR TIPO DE CONEXIÓN

Conexión en Paralelo	Conexión en Serie	Conexión en Mixto	Peso de la persona
$60.05\mu W$	$14.40\mu W$	$35.20\mu W$	68g
$87.70\mu W$	$27.90\mu W$	$46.90\mu W$	92kg
$77.20\mu W$	$44.00\mu W$	$51.50\mu W$	74kg
$81.50\mu W$	$31.50\mu W$	$51.00\mu W$	85kg

Al finalizar las pruebas y obtener los resultados mostrados en los diferentes tipos de conexión, se concluye que de los tres tipos de conexión utilizada ya sea, paralela, serie y mixta, la configuración que mejor contribuye al desarrollo de la generación de energía es la conexión en paralelo. Por lo cual, se procede a la instalación de los dispositivos en dicho modo.

*VI-Ñ. Instalación del prototipo, realización de pruebas e interpretación de resultados en campo (área determinada con tráfico peatonal)*

Para la realización de las pruebas obtenidas a continuación, fue necesario establecer la ubicación en un lugar con mucha concurrencia peatonal. De todos los lugares solicitados solamente en dos unidades educativas se autorizó la realización de estas pruebas: Unidad educativa Rashid Torbay y Unidad Educativa Inti Raimi.

Los siguientes datos otorgados a continuación fueron realizados en la unidad educativa Rashid Torbay, con ayuda de los docentes que prestan sus servicios en dicho lugar, no fue posible establecer el prototipo en el área de los estudiantes debido a que estos se encontraban rindiendo exámenes finales, por lo cual los docentes accedieron a colaborar con los siguientes datos obtenidos.



Figura 28. Realización de lecturas de tensión utilizando la alfombra.

*VI-Ñ1. Instalación rampa con alfombra:* En la imagen mostrada a continuación, se adaptó el sistema o prototipo de alfombra piezoeléctrica recolectora de energía a la entrada del aula de profesores del colegio Rashid Torbay, como podemos observar existe la adaptación de dos partes, la alfombra que posee los sensores piezoeléctricos, y la rampa que observamos al inicio la cual lleva todo el sistema eléctrico y electrónico en su interior.



Figura 29. Alfombra recolectora instalada con su rampa.

*VI-Ñ2. Distribución de circuitos y componentes:* Como se observa en la imagen a continuación, el prototipo está conformado por dos partes: la alfombra y la rampa. En la alfombra se ubican los sensores piezoeléctricos junto con sus conexiones en paralelo, mientras que en la rampa se almacena el cableado eléctrico y electrónico. Además, la rampa cumple con la función de encendido de luminarias LED, y aporta con una salida de 110V a 500W la cual permite cumplir con el objetivo de cargar o utilizar un dispositivo que requiera alimentación eléctrica.



Figura 30. Rampa y sus puertos de salida de carga.

VI-Ñ3. *Controlador PWM y salida de carga:* En el costado lateral derecho de la rampa se encuentra instalado el controlador de carga y descarga del proceso que realiza el prototipo. Este controlador PWM, de modelo W88-C, permite obtener el ingreso de voltaje y corriente que ingresa mediante los dos cables mostrados en la imagen, cuyo inicio parte desde los sensores piezoeléctricos y permiten la carga de la batería de almacenamiento. Este controlador a su vez cuenta con dos salidas de carga tipo USB a 5V-1A, lo cual permite aportar carga para dispositivos USB. Su orden de conexiones es el siguiente:

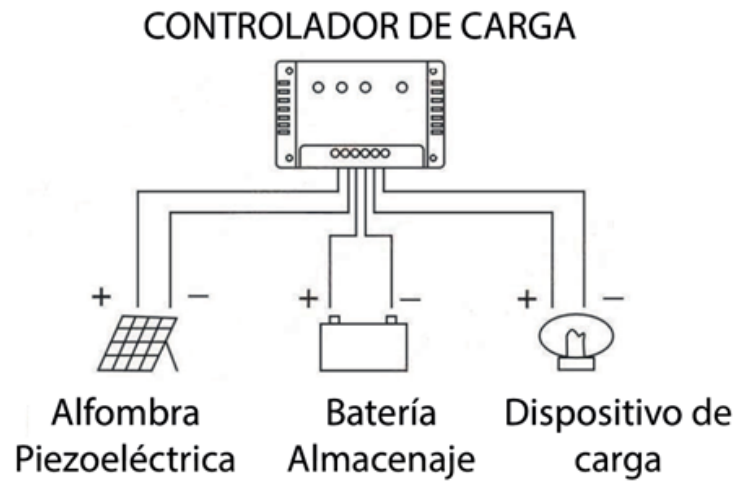


Figura 31. Orden de conexiones de controlador PWM.



Figura 32. Controlador instalado en la rampa y su salida 5V-1A.



#### VI-O. Pruebas de Voltaje en carga y descarga de la batería de almacenamiento

Se aprecia el porcentaje de batería actual mientras se encuentran habilitados y utilizados las salidas de conexión USB 5v-2A (dispositivo móvil) y la conexión eléctrica 110V a 500W (Ventilador), tal como se observa en las imágenes a continuación:

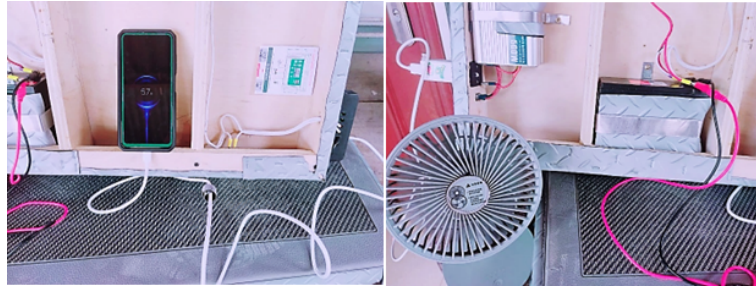


Figura 33. Pruebas de carga de celular y arranque de ventilador casero.

Se adjunta también el funcionamiento de las luminarias LED de la rampa en estado ON/OFF.



Figura 34. Encendido de luminarias LED en rampa.

#### VI-P. Pruebas realizadas en un área específica en campo

Para las pruebas realizadas, se contó con el apoyo de personal docente de la Unidad Educativa Rashid Torbay del Cantón Gral. Villamil Playas. De esta manera, se procedió a darles una breve explicación del funcionamiento del prototipo y como deberían interactuar con el mismo. El propósito era realizarlo con los estudiantes de la unidad educativa pero debido a que se encontraban rindiendo exámenes de finalización no fue posible incluirlos en las pruebas. Las condiciones climáticas hicieron parte de la negativa a realizar las pruebas en un terreno de mayor concurrencia y más amplio. Por estas razones, los docentes del establecimiento procedieron a colaborar con las pruebas.



Figura 35. Colocación de alfombra con rampa a la entrada de la sala de profesor Unidad Educativa Rashid Torbay.

En las siguientes imágenes, se observan los valores de voltaje otorgados por parte de la alfombra piezoeléctrica. Estos varían según el tipo de la pisada, el peso de la persona y la posición en que se paren en la alfombra, por lo cual los valores de voltaje obtenidos variaron desde 5V hasta 13V. Esto indica que la alfombra cumple con su propósito de generar voltajes que permitan la carga de la batería que ese encuentra en la rampa.



Figura 36. Pruebas realizadas con el personal docente a la entrada de la sala de profesores del establecimiento.

Luego de haber conectado y aprovechado los voltajes obtenidos por parte de la alfombra piezoeléctrica, se procedió a conectarlos a la rampa para que esta a su vez pueda cargar la batería. La batería, al inicio, tenía un voltaje de 12.2V y una vez conectada y cargada con la energía recolectada por parte de los participantes se obtuvo un incremento mínimo, a 12.6V.



Figura 37. Lectura de voltaje almacenado en alfombra antes de realizar las pruebas.

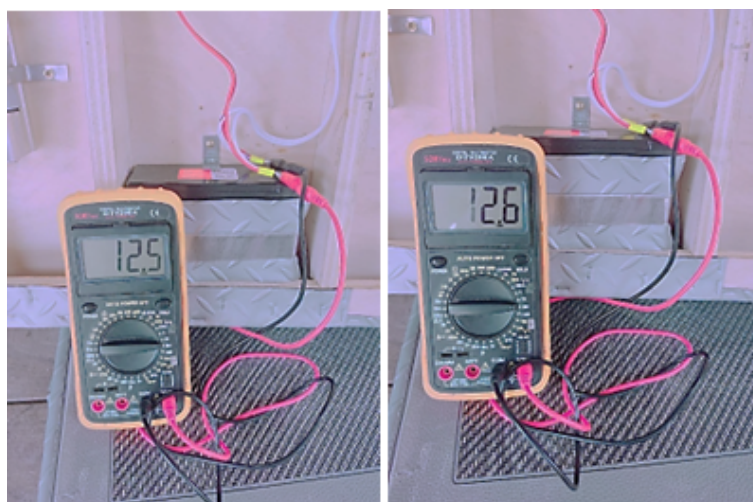


Figura 38. Lectura de voltaje almacenado en alfombra después de realizar las pruebas.

Finalmente, el voltaje máximo obtenido fue de 0.4V, lo cual permitió incrementar el voltaje de la batería de 12.2V a 12.6V.

Se debe tomar en cuenta que las personas involucradas en las pruebas en campo fueron pocas, y no existió un flujo constante de las mismas. Condiciones que claramente serían favorables para efectos de recaudación de energía de la alfombra. Sin embargo, se demostró que funciona perfectamente.

## VII. RESULTADOS

### VII-A. Gráficos de Voltaje y potencia en relación al tiempo en MATLAB

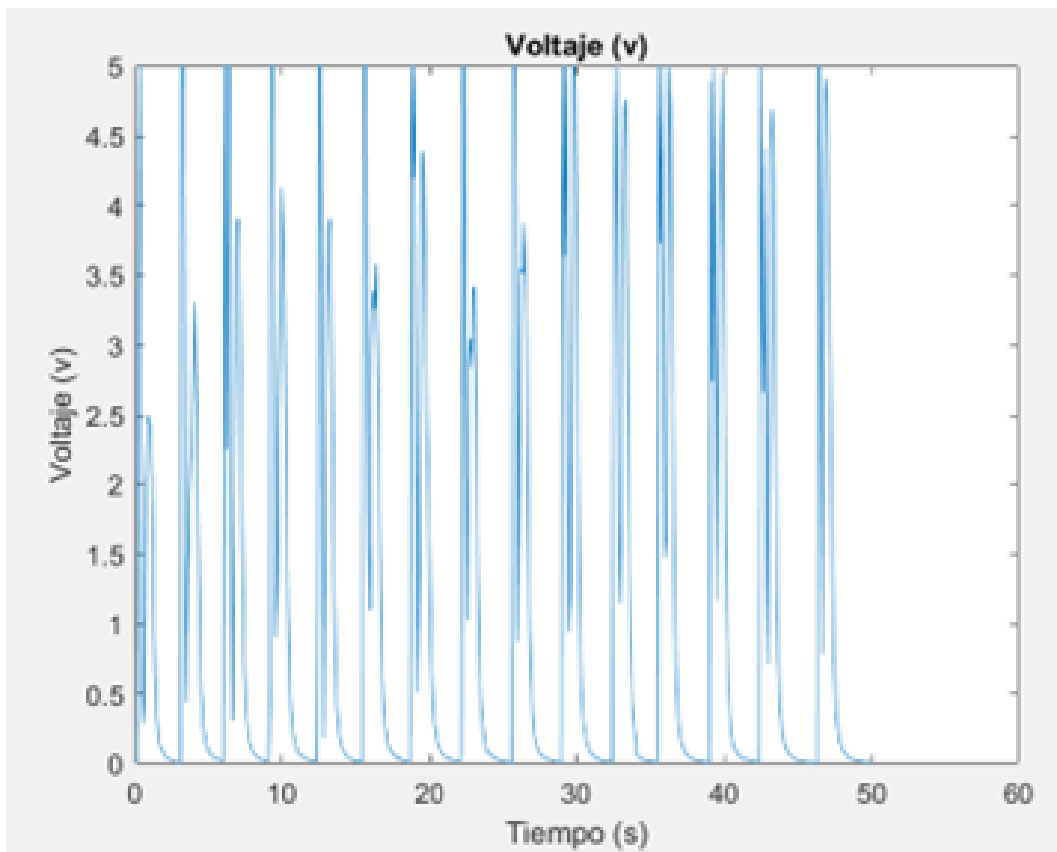


Figura 39. Voltaje vs Tiempo incidente en 15 piezoeléctricos.

*VII-A1. Gráfico Voltaje vs Tiempo:* Para la gráfica mostrada, se utilizaron 15 dispositivos piezoeléctricos conectados en paralelo, los cuales fueron sometidos a una prueba de presión, con ayuda de una persona de 92kg. A esta persona a su vez se le pidió que pisara sobre los dispositivos de equitativamente, para producir la deformación de los piezoeléctricos y obtener la salida de voltaje, cuyos valores produjeron los datos plasmados en la gráfica.

*VII-A2. Gráfico Potencia vs Tiempo:*

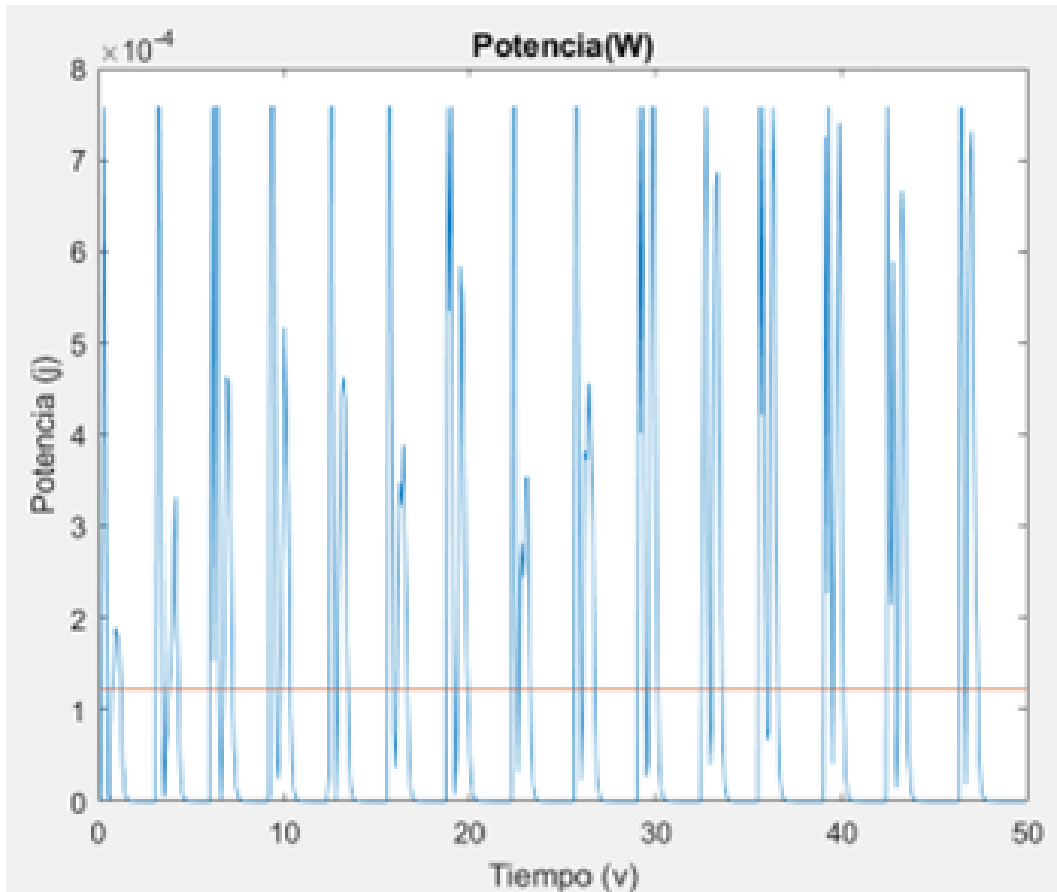


Figura 40. Potencia vs Tiempo incidente en 15 piezoeléctricos.

Se calculó la potencia obtenida por parte de los dispositivos piezoeléctricos, para lo cual se obtuvo una potencia promedio producida por los 15 dispositivos utilizados. Se definió el valor de potencia promedio en la línea de color naranja de la gráfica, el cual es de 0.000122W. Esta sería la potencia otorgada por los dispositivos piezoeléctricos en la conexión en paralelo, almacenado en el sistema de recaudación de energía.

*VII-B. Obtención de voltajes por diferente localización de pisada en la alfombra y peso del usuario*

Tabla V  
TABLA DE VALORES OBTENIDOS POR PESO. POSICIÓN DE PISADA EN ALFOMBRA: CENTRO

Peso de la persona	Voltaje producido (v)	Corriente producida (I)	Tiempo (s)	Lugar en alfombra	Pies involucrados
92kg	6.1V	0.01A	1.5s	Centro	1
68kg	4.6V	0.01A	1.5s	Centro	1
74kg	5.1V	0.01A	1.5s	Centro	1
85kg	4.5V	0.01A	1.5s	Centro	1

*VII-B1. Valores de voltaje y corriente obtenidos por peso. Pruebas usando 60 piezoeléctricos:*



Figura 41. Accionamiento de alfombra por el centro de la misma.

Tabla VI  
TABLA DE VALORES OBTENIDOS POR PESO. POSICIÓN DE PISADA EN ALFOMBRA: DERECHA

Peso de la persona	Voltaje producido (v)	Corriente producida (I)	Tiempo (s)	Lugar en alfombra	Pies involucrados
92kg	3.6V	0.01A	1.5s	Derecha	1
68kg	2.1V	0.01A	1.5s	Derecha	1
74kg	3.2V	0.01A	1.5s	Derecha	1
85kg	5.8V	0.01A	1.5s	Derecha	1



Figura 42. Accionamiento de alfombra por la derecha de la misma.

Tabla VII  
TABLA DE VALORES OBTENIDOS POR PESO. POSICIÓN DE PISADA EN ALFOMBRA: IZQUIERDA

Peso de la persona	Voltaje producido (v)	Corriente producida (I)	Tiempo (s)	Lugar en alfombra	Pies involucrados
92kg	5.7V	0.01A	1.5s	Izquierda	1
68kg	3.3V	0.01A	1.5s	Izquierda	1
74kg	4.1V	0.01A	1.5s	Izquierda	1
85kg	5.1V	0.01A	1.5s	Izquierda	1



Figura 43. Accionamiento de alfombra por la izquierda de la misma.

*VII-B2. Interpretación:*

- Cuando la alfombra se somete a la carga de una pisada con un solo pie, la misma produce valores de voltaje que varían en un rango desde 1V hasta 20V, con un amperaje constante de 0.01A. Esto indica que la alfombra es capaz de producir distintos valores de voltaje y corriente según la ubicación donde se efectúa la carga y, por ende, deformación de los piezoeléctricos. Así mismo, el peso de la persona incidirá en la obtención de estas variables, ya que de acuerdo al peso de cada individuo varía la carga puesta sobre la alfombra.
- Es importante recalcar que el caminar del ser humano no es el mismo para todos. Cada persona cuenta con una mecánica única al caminar. Esto se evidencia en la toma de muestras, en aquellos datos de voltaje irregulares obtenidos en la alfombra piezoeléctrica. En la Tabla VI previamente mostrada, se aprecia incluso cómo un individuo de menor peso produce mayor voltaje en la alfombra, a comparación de un individuo de mayor peso. Esto se debe a las características del caminar y la forma en la que fue pisada la alfombra.
- Las pruebas evidencian la existencia de valores muy ínfimos de corriente generados. Esto está relacionado a la naturaleza de la alfombra, misma que no es un generador de energía renovable a máxima eficiencia, sino que aprovecha las energías que pueden disiparse en el entorno. Además, la composición interna de los dispositivos piezoeléctricos no poseen grandes cantidades de cristal de cuarzo, elemento responsable de la generación de energía como consecuencia de la deformación. Entonces, se establece que para obtener mayor generación de energía, la alfombra debería contar con cristales de cuarzo de mayor tamaño que los usados en nuestro prototipo.

*VII-B3. Valores de voltaje y corriente obtenidos por peso. Pruebas usando 60 piezoeléctricos. Pisada completa con envión (salto):*



Tabla VIII  
 TABLA DE VALORES OBTENIDOS POR PESO. POSICIÓN DE PISADA EN ALFOMBRA: CENTRO

Peso de la persona	Voltaje producido (v)	Corriente producida (I)	Tiempo (s)	Lugar en alfombra	Pies involucrados
92kg	18.2V	0.01A	2s	Centro	2
68kg	14.1V	0.01A	2s	Centro	2
74kg	11.3V	0.01A	2s	Centro	2
85kg	13.3V	0.01A	2s	Centro	2



Figura 44. Accionamiento de alfombra por el centro de la misma.

Tabla IX  
 TABLA DE VALORES OBTENIDOS POR PESO. POSICIÓN DE PISADA EN ALFOMBRA: DERECHA

Peso de la persona	Voltaje producido (v)	Corriente producida (I)	Tiempo (s)	Lugar en alfombra	Pies involucrados
92kg	7.4V	0.01A	2s	Derecha	2
68kg	9.6V	0.01A	2s	Derecha	2
74kg	5.1V	0.01A	2s	Derecha	2
85kg	9.1V	0.01A	2s	Derecha	2



Figura 45. Accionamiento de alfombra por la derecha de la misma.

Tabla X  
 TABLA DE VALORES OBTENIDOS POR PESO. POSICIÓN DE PISADA EN ALFOMBRA: IZQUIERDA

Peso de la persona	Voltaje producido (v)	Corriente producida (I)	Tiempo (s)	Lugar en alfombra	Pies involucrados
92kg	11.1V	0.01A	2s	Izquierda	2
68kg	9.4V	0.01A	2s	Izquierda	2
74kg	10V	0.01A	2s	Izquierda	2
85kg	16.8V	0.01A	2s	Izquierda	2



Figura 46. Accionamiento de alfombra por la izquierda de la misma.

*VII-B4. Interpretación:*

- Se observa que la parte central de la alfombra es la ubicación dónde la mayor cantidad de dispositivos piezoeléctricos son pulsados y deformados. Es por esto que la Tabla VIII refleja los datos obtenidos de voltaje de mayor magnitud, incluso mayores a 11V, obteniendo de esta manera mayor eficiencia en comparación a la deformación en los laterales de la alfombra.
- Además, se obtuvo la misma corriente de 0.01A por segundo, lo que reafirma que en un segundo de accionamiento fluye una carga eléctrica de 0.01 culombios a través del circuito.

*VII-C. Cálculo de tiempo de deformación necesario para que fluya la corriente de 1 Amperio*

Para este cálculo, se utiliza la fórmula de la Ley de Coulomb. Esta establece que la corriente eléctrica es igual a la cantidad de carga eléctrica que fluye a través de un punto dado en un circuito por unidad de tiempo, por lo cual se aplicó la ecuación mostrada a continuación.

$$Tiempo = \frac{CargaEléctrica}{Corriente} \quad (10)$$

En este caso, la carga eléctrica deseada es 1 culombio y la corriente obtenida desde la alfombra es de 0.01 amperios por segundo, por lo que la ecuación sería:

$$Tiempo = \frac{1Culombio}{0,01A} \quad (11)$$

Resolviendo la ecuación, se obtiene:

$$Tiempo = 100seg \quad (12)$$

Por lo tanto, si se tiene una corriente constante de 0.01 amperios por segundo, tardaría 100 segundos (o 1 minuto y 40 segundos) en obtener una corriente de 1 amperio, suponiendo que la persona mantenga una pisada constante que signifique un dato mayor a 5V.

De ser lo contrario y producir una corriente constante de 0.001 amperios por segundo, entonces se tardaría 1000 segundos (o 16 minutos y 40 segundos) en obtener una corriente de 1 amperio.

#### *VII-D. Cálculo de cantidad de pisadas para la obtención de voltajes útiles*

En las pruebas realizadas y con ayuda de los cálculos obtenidos fue posible obtener un promedio estimado de cuantas pisadas debe realizar una persona sobre la alfombra piezoeléctrica para poder producir cierta cantidad de voltaje útil.

Para plasmar estos datos en específico, se realizaron tablas de dispersión con la finalidad de interpretar cuanto debe una persona pisar sobre la alfombra para poder producir el voltaje esperado, y a su vez la cantidad de voltaje y de corriente deseada. Estos valores de voltaje y corriente obtenidos se modificarán según las siguientes variables:

- **Peso de la persona**

El peso de la persona influye en el ámbito de que a mayor peso obtendremos mayor deformación del dispositivo piezoeléctrico, y mientras mayor sea la deformación de este obtendremos mejores cantidades de energía, es decir, mientras menos sea el peso de la persona menos será la deformación del piezoeléctrico, pero esto varía según el área de pisado en la alfombra tal como veremos a continuación.

Además, se obtuvo la misma corriente de 0.01A por segundo, lo que reafirma que en un segundo de accionamiento fluye una carga eléctrica de 0.01 culombios a través del circuito.

- **Ubicación de pisada en la alfombra piezoeléctrica**

En las tablas mostradas anteriormente, se observa que una mayor generación de energía dependerá de la ubicación donde se realicen las cargas sobre la alfombra. Si el usuario cubre una mayor área de sensores piezoeléctricos, existirá una mayor cantidad de dispositivos pulsados, por ende habrá más deformación y será mayor la cantidad de voltaje que se produzca.

- **Tiempo de la pisada sobre la alfombra**

El tiempo de pisada es un factor a tomar muy en cuenta al momento de generar energía mediante los sensores piezoeléctrico. Esto se debe a que si una persona se queda parada sobre la alfombra piezoeléctrica entonces no produciría ningún tipo de energía puesto que la generación de la misma se basa en el momento en que el cristal de cuarzo interno se deforma de manera mecánica, produciendo así energía eléctrica y esta deformación dura apenas 1 segundo, razón por la cual se generaron las distintas gráficas de dispersión de datos que veremos a continuación.

VII-E. Gráficas de dispersión de datos: Voltaje generado vs Cantidad de pisadas en relación a pesos específicos de prueba

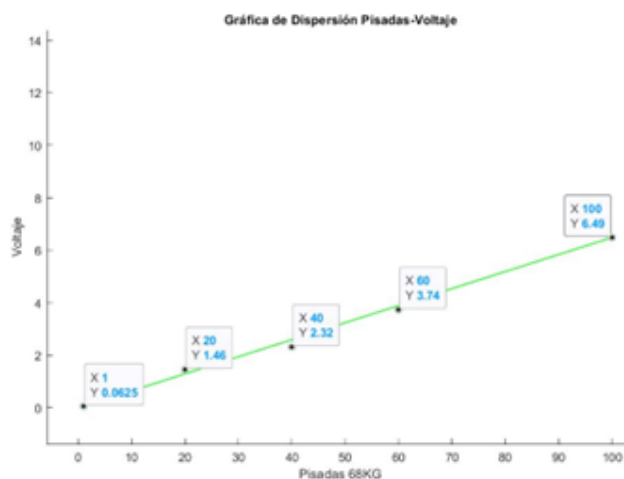


Figura 47. Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 68kg

VII-E1. Voltaje vs Pisadas de una persona de 68kg:

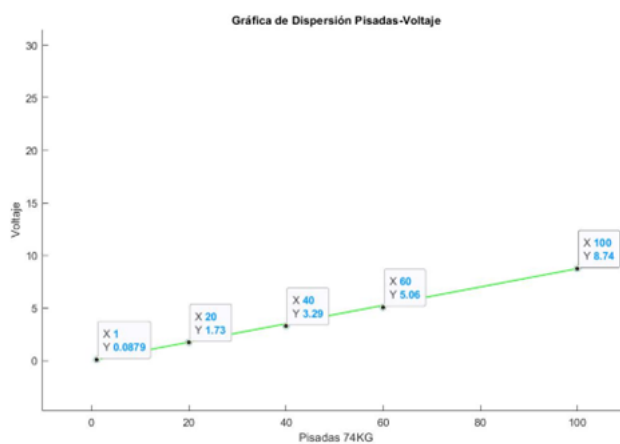


Figura 48. Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 74kg

VII-E2. Voltaje vs Pisadas de una persona de 74kg:

VII-E3. Voltaje vs Pisadas de una persona de 85kg:

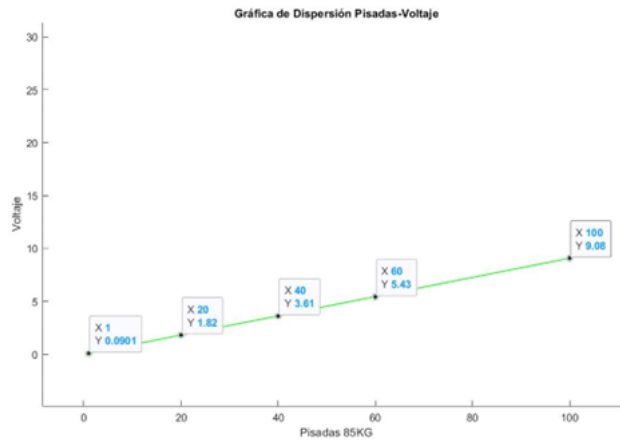


Figura 49. Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 85kg

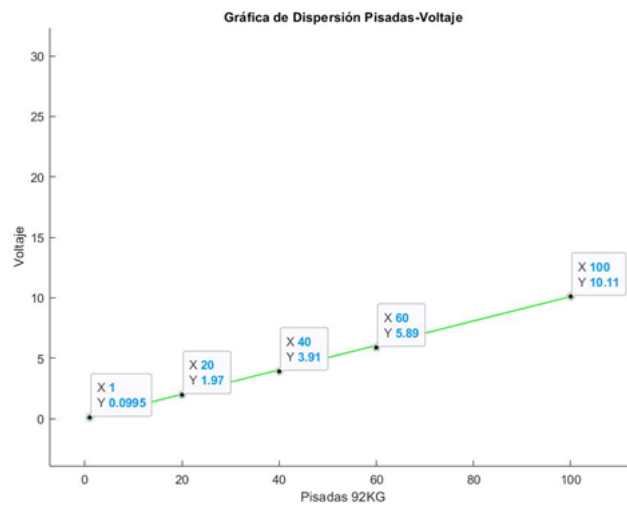


Figura 50. Dispersión de voltaje generado por número de pisadas a peso específico 92kg

VII-E4. *Voltaje vs Pisadas de una persona de 92kg:*

VII-F. Representación de mayor cantidad de energía generada dependiendo de pesos específicos

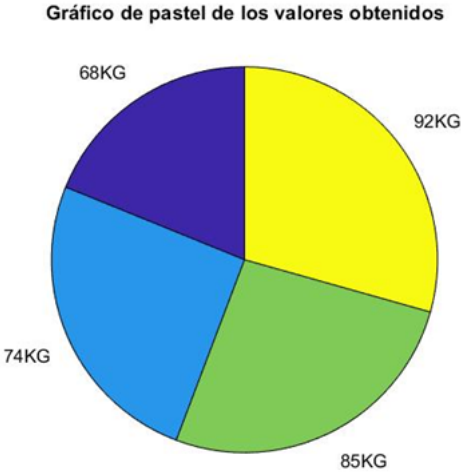


Figura 51. Representación de mayores valores de voltaje generados en relación a pesos específicos

### VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo en la siguiente figura:

**Cronograma de Actividades**

Actividades	2022					
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Diciembre
Investigación (12h)	■	■	■	■	■	■
Fundamentación Teórica (6h)	■	■	■	■	■	■
Dibujo/Boceto de Prototipo (4h)	■			■		
Selección de elementos y Cotización Prototipo (6h)		■			■	
Evaluación de Parámetros Técnicos del Sistema (24h)					■	
Dibujo de Esquema Eléctrico (6h)						■
Distribución de Piezoeléctricos en Alfombra(4h)						■
Modelado 3D (10h)				■		
Compra y Selección de Materiales (8h)						■
Ensamblaje de prototipo (6h)						■
Prueba Inicial (4h)						■
Detección y Corrección de Errores (6h)						■
Redacción de Documento (96h)	■	■	■	■	■	■
Diseño de Planos Finales						■
Presentación de Proyecto	■		■			■
Conclusión del Proyecto						■

Figura 52. Cronograma de Trabajo



## IX. PRESUPUESTO

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Valor total
Sensor Piezoeléctrico	35mm de diámetro	60	60 \$
Plancha Plywood	18mm de grosor	1	20 \$
Filamento TPU	Impresión 3D	1	26 \$
Filamento PLA	Impresión 3D	1	15 \$
Perno Acerado	1/2 pulgadas	10	17 \$
Anillos para pernos	1/2 pulgada	30	4.50 \$
Resortes	35mm	10	30 \$
Alfombra Home	45x75cm	1	18 \$
Velcro	Adhesivo	1	5 \$
Barras	Silicona	10	20.50 \$
Plancha	Cianocrilato	4	14 \$
Pinza	Amperimétrica	1	30 \$
Tornillos	Rampa	10	6.50 \$
Goma	Rampa	1	6 \$
Grapadora	Industrial	1	23 \$
Grapas	Grapadora Industrial	1	8 \$
Tapiz de auto tipo metal	2m	1	20 \$
Tiras luz LED	12V	1m	16 \$
Terminales	Batería	2	2\$
Plancha Plywood Rampa	1m	1	64\$
Inversor de Corriente	12V/120V	1	35\$
Regulador	Panel Solar	1	30\$
Batería	Seca	1	35\$
Juego de Brocas para Plywood	Circulares	1	10\$
Capacitor	25V 1000uF	20	10\$
Capacitor	16V 1000uF	20	8\$
Diodo	N4007	20	6\$
Baterías	18650	4	20\$
<b>SUBTOTAL MAQUETA</b>			<b>559.5\$</b>
Costos de envíos e importacion	Importación piezoeléctricos	1	50\$
Mano de obra	corte de madera	1	30\$
Mano de obra	corte de tapiz y velcro	1	20\$
Transporte	Transporte público y Combustible		300\$
Alimentación			250\$
<b>SUBTOTAL COSTOS LOGÍSTICOS</b>			<b>650\$</b>
<b>TOTAL(MAQUETA + COSTOS LOGÍSTICOS)</b>			<b>1209.5\$</b>

## X. CONCLUSIONES

En el marco de este proyecto, se busca profundizar en el conocimiento sobre los dispositivos piezoeléctricos y su funcionamiento, con el fin de poder diseñar e implementar un sistema capaz de generar energía eléctrica a partir de ellos. El objetivo principal de este enfoque es reducir la dependencia de las fuentes de energía eléctrica convencionales, que son altamente contaminantes y utilizan recursos no renovables.

En la actualidad, existen diversas tecnologías para la generación de energía eléctrica, entre ellas los paneles solares y la producción de energía eólica. Sin embargo, este prototipo propone una alternativa innovadora y eficiente, que consiste en aprovechar el movimiento cotidiano de las personas para transformarlo en energía eléctrica limpia. De esta manera, no solo se logra una reducción en el consumo de energía eléctrica convencional, sino que además se promueve un estilo de vida más saludable, ya que el simple acto de caminar se convierte en una actividad física que beneficia al usuario.

Es importante destacar que la eficiencia de los sistemas de generación de energía eléctrica basados en dispositivos piezoeléctricos está directamente relacionada con su uso. Por lo tanto, se recomienda instalar estos dispositivos en áreas de alta afluencia de personas o transeúntes, donde puedan aprovechar al máximo el movimiento de las personas. De esta forma, se obtiene una mayor eficiencia en la generación de energía eléctrica, lo que se traduce en una reducción significativa en el consumo de energía eléctrica convencional y una contribución positiva al medio ambiente.

Durante el desarrollo de este prototipo, se ha comprobado que los sensores piezoeléctricos generan tanto voltajes positivos como negativos. Dado que es poco probable que todos los sensores generen voltajes positivos al mismo tiempo, esto puede resultar en la cancelación de voltajes positivos con voltajes negativos. Por lo tanto, se hace necesario instalar un puente rectificador de onda completa y un diodo para transformar los voltajes negativos a positivos. Esto permite aumentar la eficiencia del circuito y reducir las pérdidas de voltaje. En resumen, la instalación de un puente rectificador y un diodo es esencial para lograr una conversión efectiva de los voltajes generados por los sensores piezoeléctricos en este prototipo.

## XI. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar investigando en el estudio de materiales piezoeléctricos como una fuente de energía eléctrica con el fin de obtener mejores resultados y aumentar su alcance y aplicación en Ecuador.

La energía generada por el efecto piezoeléctrico podría ser una fuente alternativa importante en el futuro debido al aumento en la demanda de energía eléctrica y la necesidad de reducir el consumo de recursos naturales.

Además, una manera de mejorar los parámetros mencionados sería profundizar en temas de electrónica de potencia para poder suministrar cargas de mayor potencia de manera más efectiva.

APÉNDICE A  
PLANOS

Planos de piezas fundamentales para el desarrollo de la alfombra piezoeléctrica, diseñadas en el software Autodesk Inventor 2020:

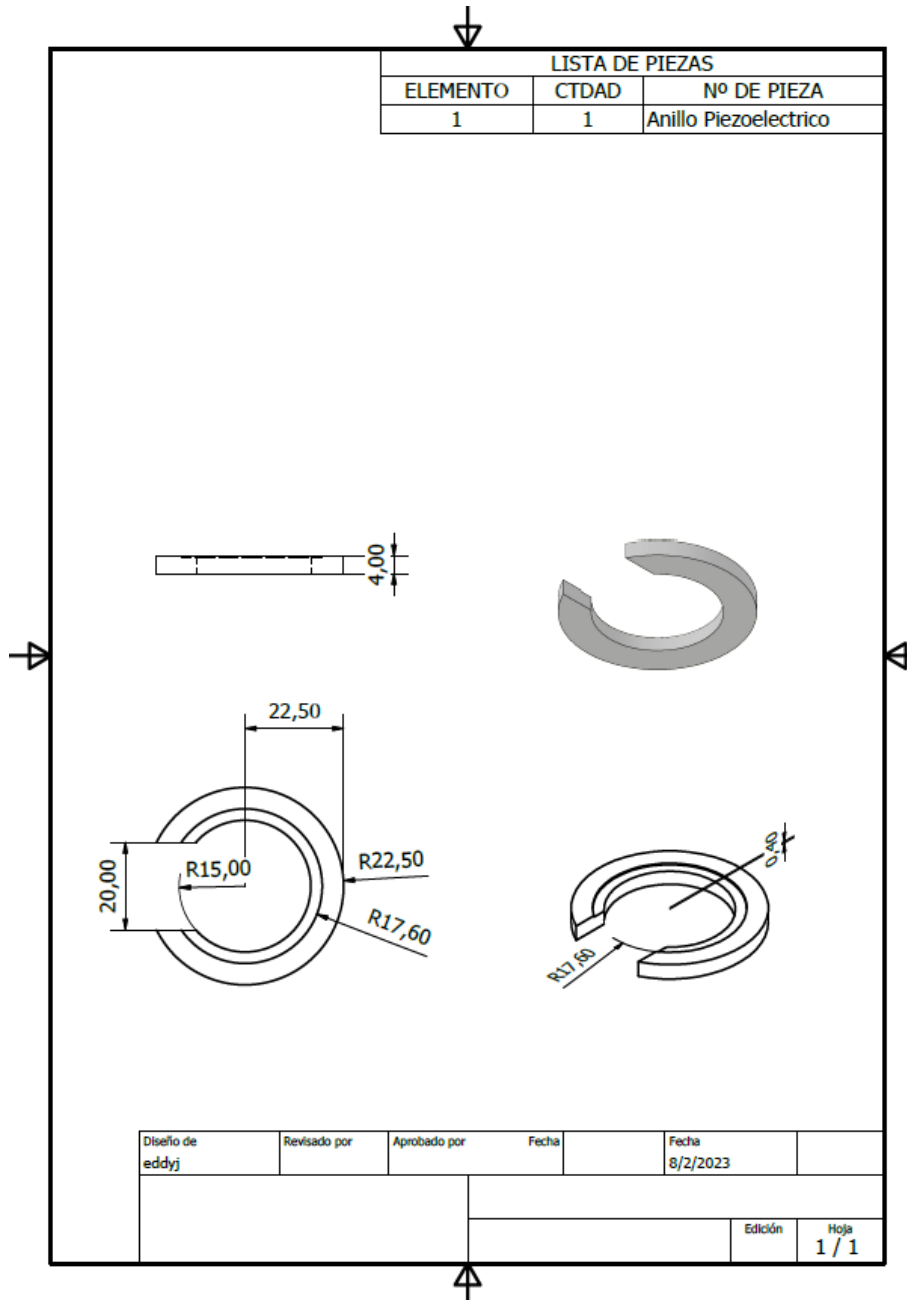


Figura 53. Anillo Piezoeléctrico, por E. Alvarado y C. Verdezoto, Autodesk Inventor

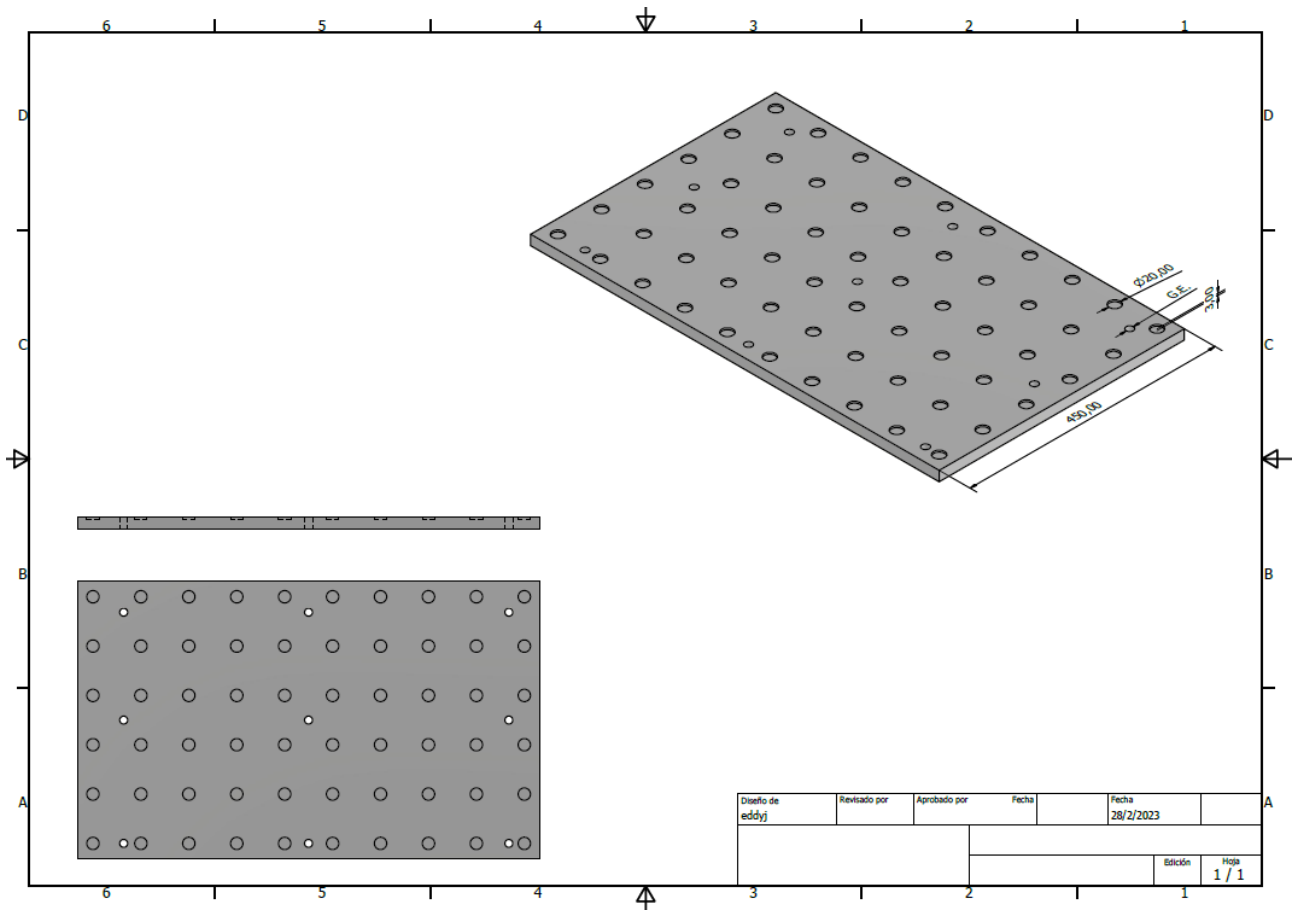


Figura 54. Vista isométrica Base de Tarugos, por E. Alvarado y C. Verdezoto, Autodesk Inventor

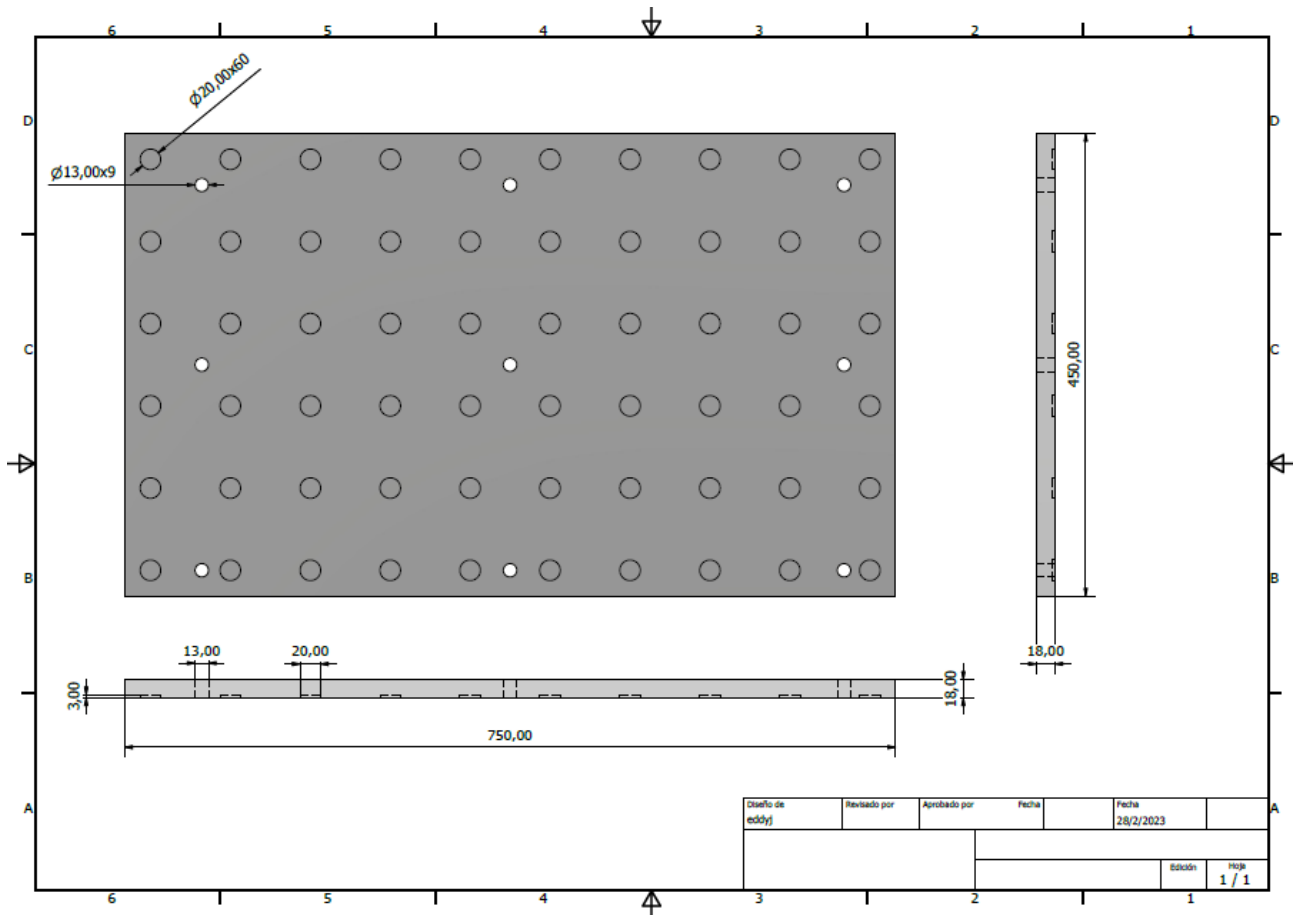


Figura 55. Vista superior Base de Tarugos, por E. Alvarado y C. Verdezoto, Autodesk Inventor

APÉNDICE B  
EVIDENCIAS DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE ALFOMBRA EN CAMPO



Figura 56. Carga de dispositivo móvil mientras se realiza la deformación de piezoeléctricos, por E. Alvarado y C. Verdezoto



Figura 57. Lectura durante utilización de alfombra piezoeléctrica, por E. Alvarado y C. Verdezoto



Figura 58. Medición de variación de tensión durante utilización de alfombra piezoeléctrica, por E. Alvarado y C. Verdezoto

### APÉNDICE C

#### SCRIPTS DE GRÁFICAS DE DISPERSIÓN POR PESO ESPECÍFICO, ELABORADOS EN EL SOFTWARE MATLAB

```
clear all
clc
%Eddy Alvarado Grafica de dispersin TT2
% Definir las variables de pisadas y voltaje
pisadas = [1, 20, 40, 60, 100];
voltaje = [0.0625, 1.46, 2.32, 3.74, 6.49];

% Graficar la dispersión
scatter(pisadas, voltaje);

% Ajustar el rango máximo de los ejes
xlim([0, 100]);
ylim([0, 30]);

% Añadir etiquetas a los ejes y título de la gráfica
xlabel('Pisadas 68KG');
ylabel('Voltaje');
title('Gráfica de Dispersión Pisadas-Voltaje');

% Agregar una línea que atraviese la gráfica
hold on;
line([min(pisadas), max(pisadas)], [min(voltaje), max(voltaje)], 'Color', 'g', 'LineWidth', 1);
```

Figura 59. Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 68kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto

```

clear all
clc
%Eddy Alvarado Grafica de dispersin TT2
% Definir las variables de pisadas y voltaje
pisadas = [1, 20, 40, 60, 100];
voltaje = [0.0879, 1.73, 3.29, 5.06, 8.74];

% Graficar la dispersión
scatter(pisadas, voltaje);

% Ajustar el rango máximo de los ejes
xlim([0, 100]);
ylim([0, 30]);

% Añadir etiquetas a los ejes y título de la gráfica
xlabel('Pisadas 74KG');
ylabel('Voltaje');
title('Gráfica de Dispersión Pisadas-Voltaje');

% Agregar una línea que atraviese la gráfica
hold on;
line([min(pisadas), max(pisadas)], [min(voltaje), max(voltaje)], 'Color', 'g', 'LineWidth', 1);

```

Figura 60. Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 74kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto

```

clear all
clc
%Eddy Alvarado Grafica de dispersin TT2
% Definir las variables de pisadas y voltaje
pisadas = [1, 20, 40, 60, 100];
voltaje = [0.0901, 1.82, 3.61, 5.43, 9.08];

% Graficar la dispersión
scatter(pisadas, voltaje);

% Ajustar el rango máximo de los ejes
xlim([0, 100]);
ylim([0, 30]);

% Añadir etiquetas a los ejes y título de la gráfica
xlabel('Pisadas 85KG');
ylabel('Voltaje');
title('Gráfica de Dispersión Pisadas-Voltaje');

% Agregar una línea que atraviese la gráfica
hold on;
line([min(pisadas), max(pisadas)], [min(voltaje), max(voltaje)], 'Color', 'g', 'LineWidth', 1);

```

Figura 61. Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 85kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto



```

clear all
clc
%Eddy Alvarado Grafica de dispersin TT2
% Definir las variables de pisadas y voltaje
pisadas = [1, 20, 40, 60, 100];
voltaje = [0.0995, 1.97, 3.91, 5.89, 10.11];

% Graficar la dispersión
scatter(pisadas, voltaje);

% Ajustar el rango máximo de los ejes
xlim([0, 100]);
ylim([0, 30]);

% Añadir etiquetas a los ejes y título de la gráfica
xlabel('Pisadas 92KG');
ylabel('Voltaje');
title('Gráfica de Dispersión Pisadas-Voltaje');

% Agregar una línea que atraviese la gráfica
hold on;
line([min(pisadas), max(pisadas)], [min(voltaje), max(voltaje)], 'Color', 'g', 'LineWidth', 1);

```

Figura 62. Scripts de gráfica de dispersión en pruebas para peso específico de 92kg, por E. Alvarado y C. Verdezoto

## REFERENCIAS

- [1] A. Almazán Verdejo, «Factibilidad de la energía eléctrica mediante piezoelectricidad,» Tesis de mtría., Universidad de México, México D.F., 2013.
- [2] R. Barzegaran y M. Gandomkar, «A review of the state of the art in inverter control techniques.,» 2018.
- [3] O. Borda, *Diseño y construcción de un dispositivo para la medición de concentraciones de gases mediante el uso de sensores piezoeléctricos*, Tesis de pregrado, 2019. dirección: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16789/2019oscarborda.pdf?sequence=5>.
- [4] U. P. de Catalunya, *Memoria del proyecto de fin de carrera: Diseño y construcción de un horno solar para el secado de plantas medicinales*, 2008. dirección: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4329/Memoria.pdf>.
- [5] I. de Ciencia de Materiales de Madrid, *Cerámicas piezoeléctricas*, n.d. dirección: <https://wp.icmm.csic.es/eosmad/lineas-de-investigacion/ceramicas-piezoelctricas/>.
- [6] Coosita, *Medidor de presión piezoeléctrico*, Presentación de SlideShare, n.d. dirección: <https://www.slideshare.net/c0osita/medidor-de-presin-piezoelctrico>.
- [7] M. Cupich, E. Nájera-Carpio y E. Hernández-Martínez, *Actuadores piezoeléctricos*, Artículo en línea, n.d. dirección: [http://ingenierias2.uanl.mx/6/pdf/6\\_Miguel\\_Cupich\\_et\\_al\\_actuadores\\_Piezo.pdf](http://ingenierias2.uanl.mx/6/pdf/6_Miguel_Cupich_et_al_actuadores_Piezo.pdf).
- [8] G. del Ecuador y A. de Regulación y Control de Energía y Recursos No Renovables, *Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano*, Accedido: 15-09-2022, 2019. dirección: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/04/Estadistica2021.pdf>.
- [9] M. A. Elgammal y M. Abdel-Salam, «State-of-charge estimation of lead-acid batteries in solar power systems: a review.,» 2020.
- [10] M. A. Elgendy, B. Zahawi y D. J. Atkinson, «Assessment of the state-of-the-art of power inverters for photovoltaic applications.,» 2013.
- [11] D. J. I. A. Erturk, *Piezoelectric Energy Harvesting*. Georgia, USA: Wiley, 2011.
- [12] M. Feldmann, C. Heinemeyer, C. Butz et al., «Design of floor structures for human induced vibrations,» 2009.
- [13] G. Fernández, *Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza*, Trabajo de fin de grado, 2018. dirección: <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>.
- [14] L. M. Fernández, M. Á. Palacios, J. de la Casa y J. L. Sánchez, «A review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems.,» 2012.
- [15] Y. Fernández y J. Miranda, *Sensores piezoeléctricos y su aplicación en la medición de procesos: revisión bibliográfica*, 2019. dirección: <https://www.redalyc.org/journal/707/70757670014/html/#:~:text=Los%20sensores%20piezoel%C3%A9ctricos%2C%20com%C3%BAmente%20llamados,investigaci%C3%B3n%2C%20tales%20como%3A%20alimenticia>.
- [16] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna, M. Castilla y J. Miret, «Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization.,» 2013.
- [17] J. Ibáñez, *Big Data: ¿Qué es y cómo puede ser útil en la investigación social?* 2013. dirección: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/14982/Ib%C3%A1%C3%B1ez.pdf>.
- [18] E. A. Ibrahim y M. M. El-Madany H. T.and El-Sayed, «A review of battery energy storage system for solar PV power generation applications.,» 2017.
- [19] S. Jacob, C. Dimenna y G. Murcia, «Generación de Energía con Materiales Piezoeléctricos,» 2018.
- [20] B. Jimenez, *Materiales piezoeléctricos*, 1.ª ed. Madrid: Editorial Complutense, 2006.
- [21] T. Kim y H. Cha, «Energy storage systems for renewable energy power sector: a review.,» 2016.
- [22] Libertad digital, «Libertad digital,» *Libertad digital*, oct. de 2009. dirección: <http://www.libertaddigital.com/ciencia/una-empresa-israeli-logra-generar-electricidadgracias-al-trafico-1276372565/>.
- [23] U. P. d. Madrid, «Noticias de la Ciencia,» *Amazings*, Abril de 2017. dirección: <https://noticiasdelaciencia.com/art/23990/sensores-piezoelctricos-para-aumentar-la-seguridad-en-carreteras> (visitado 20-10-2018).

- [24] D. meganeboy, *Aficionados a la Mecanica*, <http://www.aficionadosalamecanica.net/sensores4.htm>, [En línea], 2014.
- [25] A. Moreno-Munoz, J. Gallego-Madrid, D. Diaz-Reigosa, J. Galan-Lozano y R. Real-Calvo, «Comparison of different MPPT methods for photovoltaic systems under partial shading conditions.,» 2017.
- [26] P. Systems, *Pavengen*, [En línea]. Available: <http://www.pavegen.com/>. [Último acceso: 28 Junio 2015]. s.f.
- [27] Petroleum, BP, *BP Statistical Review of World Energy*. Londres: BP, 2017.
- [28] *Piezoelectricidad*, Página web, Repsol. dirección: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/transicion-energetica/piezoelectricidad/index.cshtml>.
- [29] P. Products, *Medical Applications of Piezoelectric Products*, n.d. dirección: <https://www.piezoproducts.com/es/applications/medical-applications/#:~:text=Los%20productos%20piezoel%C3%A9ctricos%20usan%20las, responsables%20de%20abrir%20y%20cerrar>. (visitado 03-03-2022).
- [30] Rumbo Energético, «Rumbo Energético,» *Rumbo Energético*, Diciembre de 2017. dirección: <http://rumboenergetico.com/balance-energetico-nacional-y-las-renovables/>.
- [31] B. Singh, B. Singh y A. Chandra, «A review of three-phase improved power quality AC–DC converters.,» 2013.
- [32] *Sistema de encendido piezoeléctrico*, Página web, HelloAuto. dirección: <https://helloauto.com/glosario/sistema-encendido-piezoelectrico>.
- [33] *Transductores piezoeléctricos*, Página web, Power MI. dirección: <https://power-mi.com/es/content/transductores-piezoel%7B%5C'e%7Dctricos>.
- [34] Universidad de la República. Núcleo de Ingeniería Biomédica. Facultades de Medicina e Ingeniería, «Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía,» jul. de 2012.
- [35] M. V. Zambrano y A. A. Pereira, «Historia de los materiales piezoeléctricos. Efecto piroeléctrico, electrostrictivo y electro-óptico. Proceso de fabricación de cerámicas piezoeléctricas,» 2004.