

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Industrial



ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA CON APLICACIÓN EN PLANTILLAS DE CALZADO DEPORTIVO

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Fiama Vanessa Norabuena Aliaga

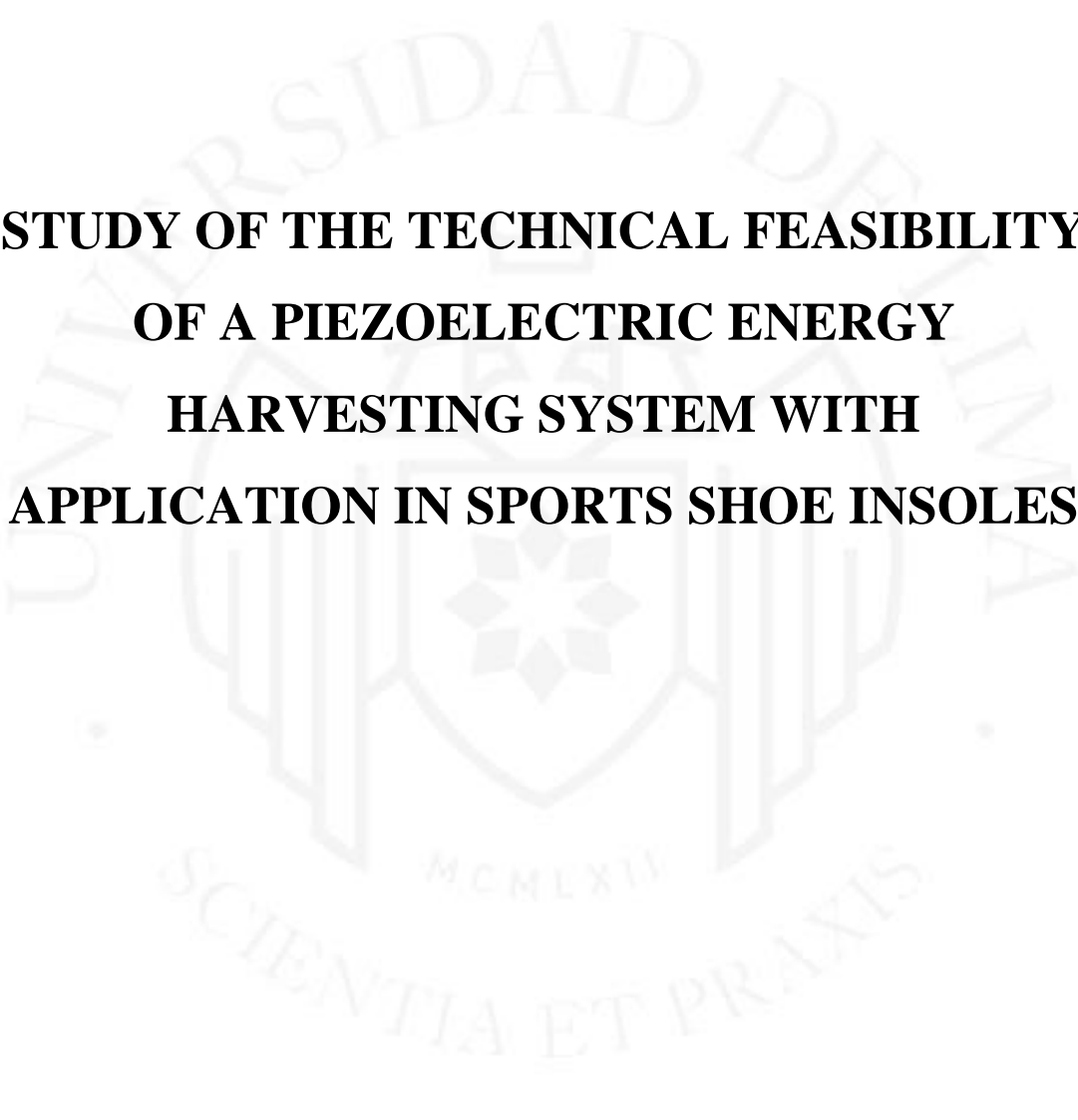
Código 20100776

Asesor

Rosa Patricia Larios Francia

Lima – Perú

Julio de 2021

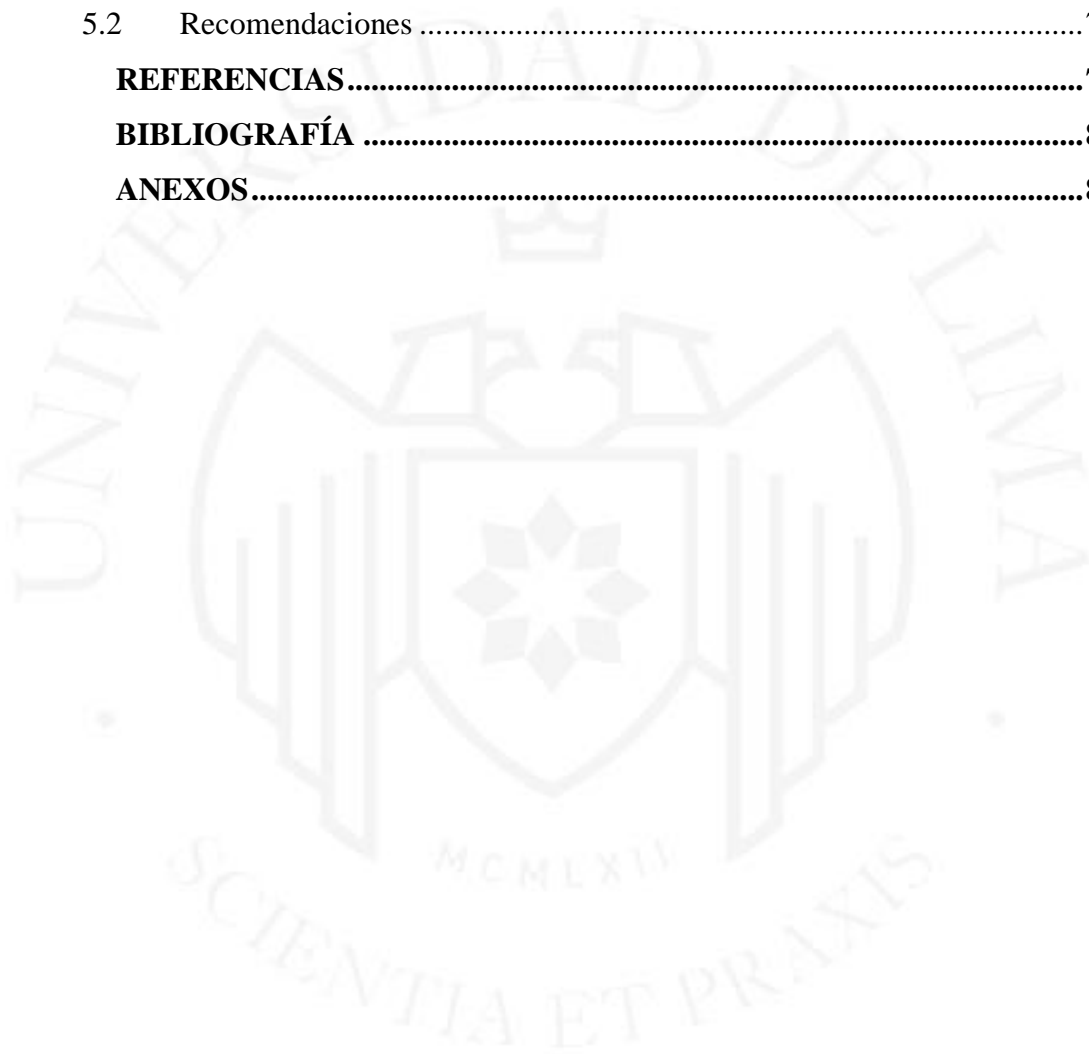


**STUDY OF THE TECHNICAL FEASIBILITY
OF A PIEZOELECTRIC ENERGY
HARVESTING SYSTEM WITH
APPLICATION IN SPORTS SHOE INSOLES**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	X
ABSTRACT.....	XI
CAPÍTULO I: PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivos de la investigación	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis del trabajo	4
1.5 Justificación de la investigación	4
1.5.1 Justificación técnica	4
1.5.2 Justificación inventiva	5
1.5.3 Justificación de sostenibilidad ambiental	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Marco referencial	8
2.2 Marco conceptual.....	9
2.2.1 Marcha y pisada humana	9
2.2.2 Sistemas de cosecha de energía (<i>Energy Harvesting</i>)	11
2.2.3 Ingeniería inversa.....	17
2.3 Glosario de términos	19
CAPÍTULO III. INGENIERÍA DEL PROYECTO	21
3.1 Tecnologías existentes	21
3.1.1 Sistemas de captación de energía.....	21
3.1.2 Materiales piezoeléctricos.....	24
3.1.3 Prototipado	26
3.2 Descripción del proceso.....	33
3.2.1 Fases de cosechamiento de energía	34
CAPÍTULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES	57
4.1 Diseño y desarrollo de los prototipos de la plantilla.....	57

4.1.1	Primer prototipo.....	57
4.1.2	Segundo prototipo.....	58
4.1.3	Tercer prototipo	59
4.2	Sistema de captación de energía	59
4.2.1	Cuarto prototipo.....	60
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		75
5.1	Conclusiones.....	75
5.2	Recomendaciones	77
REFERENCIAS.....		79
BIBLIOGRAFÍA		88
ANEXOS.....		89



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Situación de las energías renovables no convencionales en el Perú.....	2
Tabla 1.2 Cantidad de vatios generados según actividades	6
Tabla 2.1 Esquema de los tipos de Energy Harvesting.....	13
Tabla 2.2 Desarrollo de carga eléctrica del cuarzo	15
Tabla 2.3 Polarización de las cerámicas piezoeléctricas	17
Tabla 3.1 Técnicas de escaneo 3D	28
Tabla 3.2 Tecnologías de adquisición de datos en masa	29
Tabla 3.3 Softwares de ingeniería inversa	30
Tabla 3.4 Tipos de impresión 3D.....	31
Tabla 3.5 Ejemplos de software de modelamiento 3D	32
Tabla 3.6 Materiales de impresión 3D	33
Tabla 3.7 Tipos de sensores piezoeléctricos según trabajo de investigación	36
Tabla 3.8 Materiales a utilizar en el encendido del diodo LED.....	42
Tabla 3.9 Tipos de unidades de almacenamiento según trabajo de investigación.....	45
Tabla 3.10 Fase 1: Adquisición de la información geométrica	49
Tabla 3.11 Fase 2: Reconstrucción de superficies	51
Tabla 3.12 Fase 3: Construcción de la plantilla.....	53
Tabla 4.1 Resumen de los resultados de las pruebas experimentales	65
Tabla 4.2 Voltaje de salida de la prueba de medición de fuerza del piezofilm con condensador de 100 nF	68
Tabla 4.3 Voltaje de salida de la prueba de medición de fuerza del piezocerámico de diafragma con un condensador de 100 nF	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Partes del calzado deportivo	11
Figura 2.2 Efecto piezoeléctrico directo	14
Figura 3.1 Clasificación de los Energy Harvesting	22
Figura 3.2 Partes de un sensor film de PVDF.....	25
Figura 3.3 Partes de un sensor de diafragma cerámico.....	26
Figura 3.4 Fases de la descripción del proceso de cosecha de energía.....	34
Figura 3.5 Sensor piezoeléctrico PZT de diafragma cerámico	37
Figura 3.6 Posición de los contactos en el sensor piezoeléctrico PZT de diafragma cerámico.....	37
Figura 3.7 Mapa de la presión plantar al caminar.....	39
Figura 3.8 Sistema piezoeléctrico conectado en paralelo (pie izquierdo)	40
Figura 3.9 Diagrama de bloques para el encendido del diodo LED	41
Figura 3.10 Diagrama de bloques del sistema de captación de energía.....	42
Figura 3.11 Diseño del primer prototipo de la plantilla.....	47
Figura 3.12 Fases de ingeniería inversa para la elaboración del segundo prototipo.....	48
Figura 3.13 Base extruida del pie	55
Figura 3.14 Diseño impresión del tercer prototipo	55
Figura 3.15 Cuarto prototipo listo para probar	56
Figura 4.1 Impresión 3D del primer prototipo (parte talón).....	57
Figura 4.2 Dimensiones del segundo prototipo	58
Figura 4.3 Impresión del tercer prototipo	59
Figura 4.4 Prueba de presión de un sensor del sistema piezoeléctrico	60

Figura 4.5 Señal eléctrica producida al presionar los sensores piezoeléctricos del sistema	61
Figura 4.6 Respuesta al impacto del bimorfo marca APC.....	62
Figura 4.7 Cuarto prototipo para la prueba de encendido del diodo LED.....	63
Figura 4.8 Prueba del encendido del diodo LED.....	64
Figura 4.9 Prueba experimental en una trotadora	66
Figura 4.10 Cantidad de energía generada por un parche piezoeléctrico al caminar y correr	67
Figura 4.11 Medición de fuerza con pesas de precisión encima del piezofilm	68
Figura 4.12 Medición de fuerza con pesas de precisión encima del piezocerámico de diafragma	69
Figura 4.13 Simulación de caminata de 5.6 km por hora en una caminadora	70
Figura 4.14 Simulación de una caminata a 5.6 km/h para la carga de una batería de NiMH 20 mAh a 1.2 V.....	71
Figura 4.15 Generación de 12.5 V sin el uso de una resistencia al caminar a una velocidad de 5.6 km/h en una trotadora	72
Figura 4.16 Generación de 2.8 V con el uso de una resistencia de 100 K Ω al caminar a una velocidad de 5.6 km/h en una trotadora	72
Figura 4.17 Simulación de rutina de ejercicio en una bicicleta elíptica	74

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones de la impresora 3D MakerBot Replicator 2x	90
Anexo 2: Especificaciones del filamento flexible PLA	90
Anexo 3: Especificaciones del escáner 3D HandySCAN 700.....	90
Anexo 4: Especificaciones del osciloscopio digital.....	91
Anexo 5: Especificaciones del multímetro digital.....	91



RESUMEN

El tema de la presente investigación es el estudio de la viabilidad técnica de la elaboración de un sistema de captación de energía piezoeléctrica con aplicación en plantillas de calzado deportivo. El objetivo es proponer un sistema de captación de la energía generada a partir de las pisadas que se dan al caminar, para la carga de dispositivos de baja potencia.

El primer capítulo presenta la problemática de la investigación que se detalla con la introducción, el planteamiento del problema, los objetivos tanto el general como los específicos, la hipótesis a validar al finalizar el proyecto y, la justificación técnica, inventiva y de sostenibilidad ambiental.

El segundo capítulo trata sobre el marco teórico que será la base de la investigación. Se revisaron artículos científicos y tesis para la elaborar el marco referencial, y se definieron conceptos claves como parte del marco conceptual y glosario de términos.

El tercer capítulo expone la ingeniería del proyecto. Se describen las tecnologías existentes y el proceso de elaboración del sistema de captación de energía piezoeléctrica que está compuesto por cuatro fases.

En el cuarto capítulo, se dan a conocer los resultados cualitativos y cuantitativos de las pruebas experimentales de los prototipos, el sistema de captación de energía y de la literatura revisada.

Finalmente, en el quinto capítulo se concreta el proyecto de investigación con las conclusiones y recomendaciones.

Palabras claves: Fuentes de energías renovables no convencionales, sistema de captación de energía, piezoelectricidad, *wearables*, calzado deportivo.

ABSTRACT

The subject of this project is the study of the technical feasibility of developing a piezoelectric energy harvester system with application in sports shoe insoles. The objective is to propose a system for capturing the energy generated from the footsteps while walking, for the charging of low-power devices.

The first chapter presents the problem that was detailed with the introduction, the problem statement, the general and specific objectives, the hypothesis to be validated at the end of the project, and the technical, inventive and environmental sustainability justifications.

The second chapter deals with the theoretical framework of the research. Scientific articles and thesis were reviewed to elaborate the referential framework, and key concepts were defined as part of the conceptual framework and the glossary of terms.

The third chapter exposes the engineering of the project. Existing technologies and the process of elaboration of the piezoelectric energy collection system are described.

In the fourth chapter, the qualitative and quantitative results of the experimental tests of the prototypes, energy harvesting system and the reviewed literature are disclosed.

In the fifth chapter, the research project finishes with the conclusions and recommendations.

Key words: Non-conventional renewable energy sources, energy collection system, piezoelectricity, wearables, sports shoes.

CAPÍTULO I: PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se detalla cómo nació la idea del proyecto de investigación. Se tocan los temas de planteamiento de la problemática, los objetivos tanto general como específicos, la hipótesis que se espera cumplir al finalizar el proyecto y, la justificación técnica, inventiva y de sostenibilidad ambiental.

1.1 Introducción

El tema de la investigación propone evaluar el uso del fenómeno piezoeléctrico para la elaboración de plantillas que sean una alternativa de generación de energía “limpia” al aprovechar las pisadas que se dan al caminar y así poder cargar dispositivos de baja potencia.

El desarrollo de la tecnología móvil ha logrado ampliar sus funciones de tal forma que son indispensables para el día a día. Lamentablemente, la duración de la batería de los móviles no satisfacen las necesidades de los usuarios, que normalmente utilizan los enchufes conectados a la red pública para cargarlos.

El objetivo de la investigación es presentar una posible forma de generar energía limpia y abrir nuevos caminos en investigación en el Perú para poder cargar áreas, instalaciones o equipos que necesiten de mayor potencia. Se puede “cosechar” energía a partir de diferentes tipos de fuentes como la vibración, el movimiento, el calor, etc.

La literatura revisada tiene un sinnúmero de ejemplos de investigaciones similares y algunas que presentan mejoras en cuanto al diseño de los sistemas de captación de energía. Se elaboró un cosechador de energía con un parche piezoeléctrico ubicado debajo de la zona de los dedos de una plantilla para producir energía a partir de vibración constante, al caminar y correr (Ahmad & Hashim, 2011). Se mejoró el diseño de los transductores piezoeléctricos para recuperar un mayor porcentaje de energía mediante técnicas modernas (Sepúlveda Orozco, 2014). Se patentó la elaboración de un aparato cosechador de energía que genera energía al deformar un actuador piezoeléctrico ubicado entre en la suela del calzado deportivo (Face, 2006). Se diseñó un recolector piezoeléctrico en la plantilla de una zapatilla que está compuesto de un sistema que aprovecha el golpe del pie en el suelo al caminar, el balanceo de la pierna durante el

caminar y la compresión del peso de la persona (Fan et al., 2017). Se propuso una mejora a la poca energía que se genera al caminar con un colector de energía ubicado dentro del zapato que presenta un mecanismo deslizante trapezoidal (Xie & Cai, 2015).

Se considera el tema del proyecto de investigación como relevante porque da a conocer una posible forma económica y accesible en la que los mismos usuarios son los propios generadores de energía limpia al aprovechar la actividad de caminar.

1.2 Planteamiento del problema

La matriz energética del Perú está compuesta en su mayoría por la hidroelectricidad que abarca el 59.55% de la generación, seguido de la energía termoeléctrica con 35.08% de participación (COES, 2021). Ambos tipos de fuentes son utilizadas desde hace muchos años, por eso se les califica como “fuentes de energía renovables convencionales”, es decir, que son las fuentes que más se utilizan para producir energía eléctrica.

Además de las fuentes convencionales, se tienen a las “fuentes de energía no convencionales”. Según el Decreto Legilastivo N°1002 (2008) estas se refieren a “las generadoras eólicas, solares fotovoltaicas, solares térmicas, geotérmicas, mareomotrices, de biomasa y las pequeñas hidroeléctricas (de capacidad instalada hasta 20 MW)”. Actualmente, la matriz energética cuenta con la participación de la energía solar y la eólica de 1.70% y 3.66% respectivamente (COES, 2021). Mientras que la biomasa y biogas tiene 0.4% de participación (Osinermin, s.f.)

La potencia utilizada de los recursos energéticos no convencionales del país como la eólica, solar, biomasa, geotermia se observan en la tabla 1.1. Al igual que el potencial energético que se podría aprovechar y sus aplicaciones.

Tabla 1.1

Situación de las energías renovables no convencionales en el Perú

Recurso energético ^a	Potencia utilizada (MW) ^b	Potencial total (MW) ^a	Aplicación ^a
Eólico	142	22 450	Electricidad
Solar	80	No determinado	Electricidad, calor
Biomasa	27	177	Electricidad
Geotérmico	0	3 000	Electricidad, calor

Nota. ^a Osinermin (2017). ^b Osinermin (2008)

El recurso más utilizado es el eólico que aprovecha las corrientes de aire para la generación de energía amigable con el medio ambiente. Existen cuatro parques eólicos en las regiones de Ica, La Libertad y Piura. Para el 2016, las centrales aportaban 239 MW (Perú 21, 2016). Se necesitaron de 165 millones de dólares para el último parque construido en Ica (Enel, 2018). En cuanto al recurso solar que aprovecha para la transformación directa del sol en energía eléctrica, hasta el 2018, se tienen 7 centrales solares en las regiones de Moquegua, Arequipa y Tacna con una potencia de 184 MW y una inversión de 217 millones de dólares (Osinermin, 2018). Por otro lado, la generación eléctrica a partir del bagazo y follaje de la caña de azúcar, residuos urbanos y basura en centrales termoeléctricas biomasa están presentes en Ancash, Lima y Piura. La potencia instalada es de 21 MW y se necesitó una inversión de 9 millones de dólares (Osinermin, 2018). Por último, la situación geotérmica no ha mejorado por temas políticos y técnicos que no permiten sacar provecho a un recurso que emite una cantidad mínima de gases de efecto invernadero ya que es 99% vapor de agua (Capcha, 2017).

Las cifras explicadas anteriormente concluyen con la importancia de contar con una gran cantidad de inversión inicial y de terrenos de gran tamaño para la construcción de la infraestructura de los proyectos. Es importante también mencionar al cambio climático y la intermitencia que afectan directamente a la disponibilidad de las fuentes de energía renovables, ya que estas dependen de clima y del tiempo.

Sin embargo, existen descubrimientos que amplían la variedad de fuentes no convencionales y que no han sido mencionados anteriormente, los que hacen posible que se pueda pensar en proyectos de menor inversión, sin necesidad de grandes instalaciones, de ubicación en la zona urbana y que no están sujetos a las condiciones climáticas.

Según Sepúlveda Orozco (2014), estas desconocidas tecnologías se encargan de recuperar, reutilizar y aprovechar los diferentes tipos de energía que se encuentran en el ambiente y que usualmente se desperdician. A este término se le ha denominado “cosecha de energía” más conocido como “*Energy Harvesting*”.

Este concepto se combinó con la actividad de caminar y la piezoelectricidad para elaborar un sistema piezoeléctrico con la función de un *wearable*, capaz de generar corriente eléctrica de la energía excedente que se pierde al caminar. De este modo, se espera poder cargar las baterías de dispositivos de baja potencia con los pasos que se den durante un determinado periodo de tiempo.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar la viabilidad técnica de la elaboración de un sistema de captación de energía con aplicación en plantillas que al pisarlas generen energía a partir del uso del fenómeno piezoeléctrico.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Indagación del estado del arte del uso del fenómeno piezoeléctrico como sistema de captación de energía
- b) Proponer la aplicación de la piezoelectricidad en plantillas del calzado deportivo y diseñar prototipos
- c) Validación del diseño de los prototipos y del sistema de captación de energía

1.4 Hipótesis del trabajo

El uso del fenómeno de la piezoelectricidad es técnicamente viable para la generación de energía limpia mediante del uso un sistema de captación de energía ubicado en las plantillas del calzado deportivo.

1.5 Justificación de la investigación

1.5.1 Justificación técnica

El desarrollo de la plantilla piezoeléctrica es técnicamente viable, ya que se cuenta con las materias primas necesarias y con artículos científicos como base que respaldan la investigación.

La literatura revisada presenta varias investigaciones de aplicaciones de los sistemas de captación de energía basadas en el término *Energy Harvesting*, pueden ser desde simples hasta muy complicadas. Ahmad & Hashim (2011) escogieron un circuito cosechador de energía a partir del movimiento humano, que puede cargar una batería recargable de 40 mAh a una velocidad de 5 km/h. Sepúlveda Orozco (2014) hizo cambios en un modelo de sensor piezoeléctrico para maximizar la cantidad de energía generada al caminar con resultados de potencia de 78.4 μ W. Fan et al. (2017) diseñaron una estructura

bastante compleja que se trata de un recolector piezoeléctrico montado en la plantilla de una zapatilla. Este está compuesto de un sistema que aproveche todos los movimientos que se dan al caminar como el golpe del pie en el suelo al caminar, el balanceo de la pierna durante el caminar y la compresión del peso de la persona. Se logró generar 0.03 MW a 0.35 MW al caminar en velocidades de 2 a 8 km/h respectivamente. Xie & Cai (2015) elaboraron un mecanismo deslizante trapezoidal especialmente para compensar la poca energía que se genera al caminar con la ayuda de engranajes, un microgenerador y resortes. Se reportó la generación de aproximadamente como 1 W durante la caminata normal.

1.5.2 Justificación inventiva

Con la introducción de muchos dispositivos electrónicos portátiles de mano, el *Energy Harvesting* se ha convertido en uno de los temas fascinantes de interés para proporcionar energía eléctrica portátil. Las fuentes de uso común son: energía solar, energía eólica y piezoelectricidad (John Livingston & Hemalatha, 2014).

La investigación propone a la piezoelectricidad como una nueva fuente de energía limpia que se genera al caminar. Además, este tipo de fuente no tiene costo de generación, está disponible en cualquier momento del día, y, se espera que pueda cargar dispositivos de baja potencia sin la necesidad de un enchufe.

Tomando como referencia a Sepúlveda Orozco (2014), el cuerpo humano es altamente flexible para la generación de potencia útil, siendo una gran fuente de energía que no está siendo aprovechada como se debería. La disipación de calor, la rotación de articulaciones, el peso corporal, entre otras son claros ejemplos que se pueden aprovechar mediante los *Energy Harvesting* que al ser combinados con actividades físicas cotidianas y hasta con fenómenos metabólicos se puede recuperar energía y ser fuente de alimentación de energía de dispositivos de baja potencia.

Algunas de las actividades físicas cotidianas que se pueden aprovechar se presentan en la tabla 1.2 de la siguiente página, al igual que la energía humana consumida. Estos son ejemplos que se pueden explotar para la generación de energía. La actividad de caminar, por ejemplo, genera 163 W. Es decir, la cantidad de trabajo que se genera al caminar es de 163 J por segundo.

Tabla 1.2

Cantidad de vatios generados según actividades

Actividad	Kilocalorías/hora	W
Dormir	70	81
Comer	110	128
Dar un paseo	140	163
Nadar	500	582
Correr	900	1 048

Nota. Adaptado de “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (*Energy Harvesting*) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar”, por E. Sepúlveda, 2014 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>)

Según Sepúlveda Orozco (2014), otro ejemplo es la cantidad de energía eléctrica que consume el cuerpo en partes específicas y la cantidad que se puede recuperar de ellas. La actividad de caminar o pisar puede generar la mayor cantidad de energía eléctrica con un aproximado de 67 W de los cuales se pueden recuperar 5 a 8.3 W.

Por otro lado, John & Hemalatha (2014) describen en su investigación que “un ser humano mientras camina ejerce unos 30 W de potencia en el suelo y, en teoría, es posible obtener 100 mW de potencia eléctrica sin alterar la comodidad del caminar de la persona”.

En resumen, sin la necesidad de requerir a los métodos comunes de generación de energía como quemar combustibles fósiles, de cantidades importantes de inversión para la ejecución de los proyectos y la construcción de grandes instalaciones, se puede generar electricidad al realizar la actividad que más hace el ser humano que es caminar.

1.5.3 Justificación de sostenibilidad ambiental

Palomino Vera (2016) explica el término de *Energy Harvesting* como el proceso de recuperación de energía desperdiciada por el medio ambiente o a través del cuerpo humano para su posterior conversión en energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar pequeños dispositivos electrónicos de baja potencia. Los ejemplos de fuentes que se pueden recuperar del medio ambiente son la vibración, el calor, luminosa, presión, etc.

El proyecto de investigación propone centrarse en la captura de “energía” de las pisadas que se dan al caminar por los mismos usuarios del dispositivo piezoeléctrico. Estos usuarios se convertirán en sus propios generadores de energía eléctrica. Por lo tanto, sentirán que son parte clave en la generación de energía limpia y que aportan a la reducción de su huella ecológica con cada pisada que den.

Una de las principales actividades diarias de las personas es caminar, por esta razón es mucho más fácil concientizar a los usuarios que no tengan una actitud positiva frente a la reducción del impacto ambiental o, los que tienen todas las ganas de apoyar, pero no saben cómo y/o sienten que no aportan lo suficiente.

Por otro lado, John & Hemalatha (2014) indica que la recolección de energía piezoeléctrica se puede usar como una forma más limpia de fuente de energía alternativa en el futuro, generando así ningún tipo de contaminación ambiental como gases de efecto invernadero al usar dispositivos piezoeléctricos, ni residuos difíciles de tratar.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se analiza y revisa el marco teórico del proyecto. Se revisaron artículos científicos y tesis como parte del marco referencial. También se enumeraron definiciones clave como parte del marco conceptual.

2.1 Marco referencial

Se analizó la literatura de hace 15 años para profundizar en conceptos claves. A continuación, se detallan las referencias del proyecto de investigación.

- Casanova Gómez (2013). **Sistemas de Cosecha de Energía para Sistemas Electrónicos Autónomos.**

La tesis estudia y caracteriza los métodos de captura y cosecha de energía a partir de las vibraciones proporcionadas por sistemas electromagnéticos, como un motor de corriente continua. Además, propone un diseño mejorado de sistemas para captar la energía disponible.

Se tomó como referencia para la investigación, la arquitectura de un sistema de cosecha de energía que presenta cuatro partes fundamentales para la captación y almacenamiento de energía.

- Sepúlveda Orozco (2014). **Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrica mediante la Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar.**

La tesis de magíster presenta el desarrollo de un prototipo cosechador de energía piezoeléctrica mediante el Método de Optimización Topológica (MOT), que emplea un método numérico para la solución de problemas complejos de ingeniería y que busca la mejora del prototipo cosechador mediante técnicas innovadoras.

La aplicación está orientada a la construcción de zapatos con dispositivos piezoeléctricos de modelo PZT Cymbal. El diseño de este dispositivo

piezoeléctrico ha sido previamente modificado por el método MOT para aumentar la cantidad de energía recuperada.

La teoría y las referencias de la tesis han servido como bases para el mejor entendimiento del tema y para profundizar los conceptos que se desconocían.

- Ahmad & Hashim (2011). **Development of Energy Harvesting Device using Piezoelectric Material.**

El paper trata sobre la cuantificación de la cantidad de energía generada por un cosechador de energía piezoeléctrica a partir de las vibraciones del medio ambiente y del movimiento humano. Los autores elaboraron un cosechador que consta de una lámina de zinc que contiene un parche cerámico piezoeléctrico PZT. Se cargó una batería recargable de 40 mAh en menos de 10 minutos al aplicar vibración constante y en 1 hora al correr 5 km/h.

Se considera importante esta referencia, ya que nos da a entender que es posible la carga de baterías a partir del movimiento humano.

2.2 Marco conceptual

Se presentan a continuación conceptos generales e importantes que ayudarán a entender mejor el tema propuesto. Estos son la fuerza que se aprovechó para la generación de energía “verde” que es la pisada humana mediante el uso de plantillas que recuperan la energía desperdiciada mediante la cosecha de energía piezoeléctrica. La materialización del proyecto se llevó a cabo mediante la ingeniería inversa que utilizó la tecnología de escaneo e impresión en tres dimensiones para el trabajar con las medidas reales de un pie.

2.2.1 Marcha y pisada humana

La marcha humana o caminata de una persona se caracteriza por su modo de andar que implica una secuencia repetitiva de movimientos de las extremidades para mover el cuerpo hacia adelante mientras se mantiene la estabilidad (Hegde et al., 2016). Agudelo Mendoza et al. (2013) lo define como “el paso bípedo que utiliza la raza humana para desplazarse de un lugar a otro, con bajo esfuerzo y un mínimo consumo energético”.

Las fases de la caminata empiezan con el apoyo del talón en la superficie, luego

el medio pie hasta llegar al apoyo completo, terminando con el total despliegue del talón de la superficie, y repitiéndose hasta llegar a una determinada ubicación.

Por otro lado, Barreto Andrade et al. (2017) define la marcha atlética como una actividad deportiva en la que se realiza un desplazamiento paso a paso, en el cual hay que mantener un contacto constante con el suelo de al menos uno de los dos pies; además, el movimiento se realiza sin flexionar las rodillas, es decir, las rodillas se mantienen en extensión durante la marcha atlética.

Según Hegde et al. (2016) , para ambos tipos de marcha se requiere del uso de un calzado cómodo que actúe como interfaz entre el suelo y el pie del usuario. Esta se ha convertido en una parte insustituible de la vida humana en todo el mundo. Si bien la necesidad inicial era puramente proteger los pies, también se han convertido en un símbolo de estilo y personalidad.

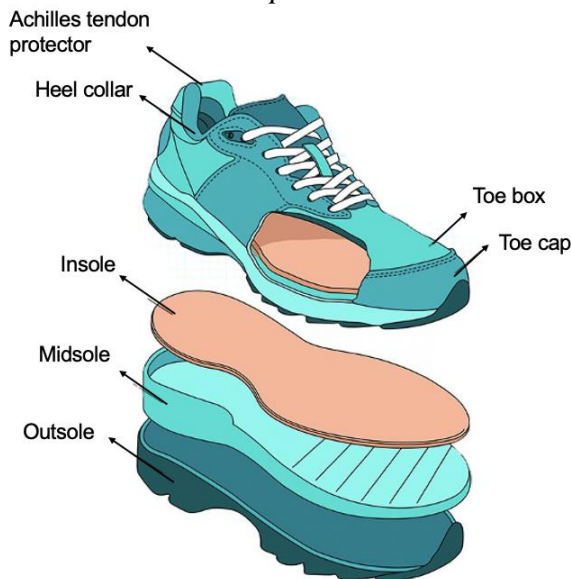
Con los avances tecnológicos, la electrónica se ha integrado en el uso del calzado para obtener mucha información con fines de investigación y de producción comercial. Las aplicaciones para sistemas basados en el calzado van desde soluciones simples de conteo de pasos hasta sistemas más avanzados destinados a ser utilizados en programas de rehabilitación para personas discapacitadas.

2.2.1.1 Plantilla

La plantilla o también denominado “ortesis plantar” se denomina como la pieza que separa la planta del pie de la suela del calzado (Perales Alcacio, 2010). Como se puede ver en la figura 2.1 de la siguiente página, la plantilla (*insole*) del calzado deportivo está ubicada encima de la entre suela (*midsole*) y la suela (*outsole*) que está en contacto con el suelo.

Figura 2.1

Partes del calzado deportivo



De “Calzado deportivo: las características y el calce adecuados para mantenerte en movimiento”, por Mayo Foundation for Medical Education and Research, 2020 (<https://www.mayoclinic.org/es-es/healthy-lifestyle/fitness/in-depth/walking/art-20043897>)

Generalmente, esta pieza debe coincidir con el diseño de la suela del calzado, para así poder estar cómodo al realizar alguna actividad. Además, debe presentar una estructura que mejore la absorción de impacto y reduzca los síntomas de algunas afecciones del sistema óseo.

Las plantillas tienen dos funciones básicas: repartir las cargas soportadas por el pie distribuyéndolas sobre toda la planta y, almohadillar el apoyo de las zonas donde este es inadecuado (Perales Alcacio, 2010). Los materiales que se utilizan para la elaboración de las plantillas son tela, goma, espuma, silicona, resina, poliuretano, etc. En algunos casos, se utilizan para la corrección de patologías que presenten los pacientes como traumatismos, diabetes, rigidez, contracturas, prominencias óseas, etc.

2.2.2 Sistemas de cosecha de energía (*Energy Harvesting*)

Según Xie & Cai (2015), los avances recientes en tecnología de comunicación e ingeniería electrónica han dado como resultado el rápido desarrollo de dispositivos *wearables* o por su traducción al español “vestibles”, que se refiere a los dispositivos electrónicos de tamaño y diseño que pueden ser llevados por el usuario. Aunque estos dispositivos avanzados hacen que la vida diaria sea más

conveniente, sus baterías de litio requieren una recarga frecuente, lo que crea otros tipos de inconvenientes. Por lo tanto, se deben encontrar fuentes de energía sostenibles para dispositivos portátiles para reducir su dependencia de fuentes eléctricas externas.

Por otro lado, Maiwa (2016) detalla que las fuentes de energía sostenible disponibles en el medio ambiente pueden ser aprovechadas por los dispositivos de *Energy Harvesting* o de traducción “cosecha de energía” que convierten la energía ambiental en energía eléctrica para crear un sistema de suministro de energía autosuficiente.

Otras definiciones del concepto de *Energy Harvesting* se muestran a continuación. Ahmad & Hashim (2011) describe “el término de *Energy Harvesting* o *Power Harvesting* o *Energy Scavenging* como el proceso en el cual la energía derivada de fuentes externas es capturada y almacenada”. Jiménez Martínez et al. (2015) lo define como “el proceso por el cual la energía derivada de fuentes externas es convertida a energía eléctrica que se almacena para poder servir como fuente de energía en la alimentación de sistemas electrónicos de bajo consumo”. En resumen, Maiwa (2016) define que “el concepto de *Energy Harvesting* es el proceso de capturar pequeñas cantidades de energía de fuentes externas de energía natural, acumulándolas y almacenándolas para su uso posterior”.

En el esquema de la tabla 2.1 de la siguiente página, se observan ejemplos de las fuentes de energía de los *Energy Harvesting* que se pueden sacar provecho, divididos en entornos macro y micro. Tradicionalmente, solo se consideraban las fuentes tipo macro como la energía como solar, eólica, mareomotriz, etc., con el fin de lograr una mejor gestión en cuanto a soluciones energéticas y poder así reducir el consumo de combustibles fósiles.

Tabla 2.1*Esquema de los tipos de Energy Harvesting*

Tipos de Energy Harvesting	Fuente de energía	Solución	Meta
Macro	Solar, eólica, mareomotriz, etc.	Gestión energética	Reducción de la dependencia del petróleo
Micro	Movimiento, vibración, calor, etc.	Dispositivos de ultra-baja potencia	Manejo de dispositivos que consumen poca energía

Nota. De “Energy collection via piezoelectricity”, por C. N. Kumar, 2015 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/662/1/012031>)

Con el pasar de los años y con los avances tecnológicos, se pudo ampliar la variedad de fuentes de energía limpia a escala pequeña para poder aprovechar energías a partir del calor, biomecánica, vibración, luminosa, térmica, mecánica, etc. Generalmente, el tipo micro de *Energy Harvesting* es aplicado a sistemas pequeños, inalámbricos y autónomos como los *wearables* y los sistemas de sensores inalámbricos para la captura de energía de fuentes externas y el almacenamiento de esta (Ahmad & Hashim, 2011).

Jiménez Martínez et al. (2015) recomienda “estos sistemas son muy interesantes en entornos donde no existe red de suministro eléctrico, donde se deba minimizar al máximo la sustitución de baterías o donde no puedan instalarse baterías por motivos de seguridad”. Además de la minimización de los gastos de mantenimiento asociados y el reemplazo de los cables de alimentación (Maiwa, 2016).

2.2.2.1 Piezoelectricidad

Los cristales piezoeléctricos se pueden utilizar para obtener voltajes de valores muy pequeños cargando así dispositivos de bajo voltaje. Por lo tanto, la recolección de energía piezoeléctrica se incluye en la categoría de esquema de recolección de energía a micro escala (Kumar, 2015).

La palabra piezoelectricidad viene del griego “piezein” que significa “presión” y se define como generación de energía a partir de presión. Este fenómeno se observó por primera vez en 1880 cuando los hermanos Jacques y Pierre Curie notaron que los cristales minerales como el cuarzo, turmalina, blenda o esfalerita y topacio, se polarizaban cuando se les aplica una fuerza mecánica. La estructura interna de cristal está compuesta por

átomos que presentan cargas positivas y negativas que normalmente están dispersas uniformemente.

En 1944, los investigadores B.M. Wool y I.P. Goldman desarrollaron sensores piezoeléctricos sintéticos haciendo uso del primer método de sinterización de la piezocerámica de titanato de bario. Posteriormente, se crearon las piezocerámicas PZT (titanato circonato de plomo) y PVDF (fluoruro de polivinilideno).

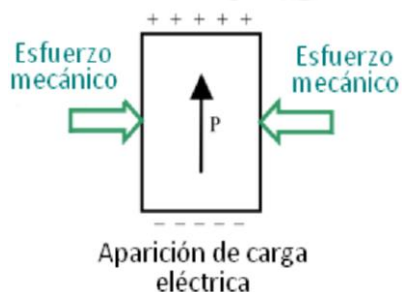
González et al. (2009) detalla que, por su naturaleza cerámica, estos materiales piezoeléctricos pueden tener cualquier forma o tamaño con la dirección de polarización elegida libremente para cumplir con todas las necesidades de diseño del transductor. Además, son extremadamente firmes, es decir, son capaces de producir o soportar muy grandes esfuerzos.

Existen dos tipos de efecto piezoeléctrico, el directo y el inverso. El efecto piezoeléctrico directo se emplea en la fabricación de sensores y el efecto piezoeléctrico inverso se emplea en la fabricación de actuadores (John Livingston & Hemalatha, 2014).

En la figura 2.2, se puede observar que, al ejercer presión, las cargas positivas y negativas se agrupan en los extremos generando una diferencia de potencia. Es decir, que el material piezoeléctrico que se use producirá energía eléctrica de la vibración o si se le aplica una fuerza (Ahmad & Hashim, 2011). A este efecto se le conoce como “efecto piezoeléctrico directo”, en el cual se basa el proyecto de investigación.

Figura 2.2

Efecto piezoeléctrico directo



Adaptado de “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (*Energy Harvesting*) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar”, por E. Sepúlveda, 2014 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>)

Por otro lado, existen materiales piezoeléctricos que son capaces de hacer el efecto inverso. Este efecto se define como la deformación en el cristal causada cuando se aplica un voltaje eléctrico a los materiales piezoeléctricos (John Livingston & Hemalatha, 2014). Lo que quiere decir que, al aplicar un campo eléctrico, se generan vibraciones mecánicas en el material (Fernández Galeano, 2018).

Los sensores a utilizar en el proyecto de investigación son los sensores piezoeléctricos que están hechos de materiales piezoeléctricos que se caracterizan por su capacidad de emitir una señal eléctrica proporcional al esfuerzo aplicado al material (Mohammadi, 2013). Entre los sensores piezoeléctricos más conocidos y usados en la industria, se encuentran los naturales como el cuarzo y el PZT en cuanto a piezoeléctricos artificiales cerámicos. A continuación, se detallan ambos tipos de sensores piezoeléctricos.

- **Cuarzo**

Mohammadi (2013) detalla que “el cuarzo, de fórmula química SiO_2 , presenta en su estructura tres moléculas de SiO_2 que construyen cada celda unitaria. En la celda unitaria, hay tres átomos de silicio y seis átomos de oxígeno”.

Este modelo se puede observar con más detalle en la tabla 2.2, en donde se ilustra que el material cristalino puede desarrollar una carga eléctrica en su superficie en respuesta a una deformación mecánica.

Tabla 2.2

Desarrollo de carga eléctrica del cuarzo

Estado neutro de los átomos de cuarzo	
<p>El oxígeno se agrupa en pares. Cada átomo de silicio lleva cuatro cargas positivas y un par de átomos de oxígeno lleva cuatro cargas negativas (dos por átomo). Por lo tanto, una celda de cuarzo es eléctricamente neutra en condiciones sin estrés.</p>	

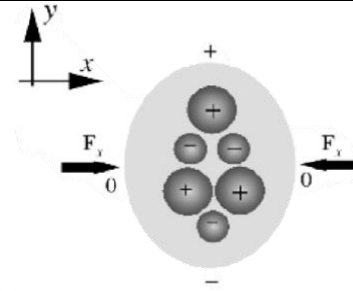
(continúa)

(continuación)

Aplicación de fuerza en el eje x al cristal cuarzo

Cuando se aplica una fuerza externa, simbolizado con las letras “Fx”, a lo largo del eje x, la red hexagonal se deforma.

La fuerza de compresión desplaza los átomos en un cristal de tal manera que la carga positiva se acumula en el lado del átomo de silicio y la carga negativa en el lado del par de oxígeno. Por lo tanto, el cristal desarrolla una carga eléctrica a lo largo del eje y.



Nota. Adaptado de “A comparison between quartz and PZT ceramic for sensoric applications”, por M. M. Mohammadi, 2013 (<http://firepubs.com/article/comparison-between-quartz-and-pzt-ceramic-sensoric-applications>)

- **Cerámicas piezoeléctricas**

La cerámica piezoeléctrica, descubierta en la década de 1950, experimenta un efecto piezoeléctrico mucho más fuerte. La cerámica piezoeléctrica debe someterse a un proceso de polarización para que ocurra el fenómeno piezoeléctrico, mientras que los materiales de cristal son naturalmente piezoeléctricos. La cerámica piezoeléctrica más utilizada es el titanato de circonato de plomo (PZT).

Según Sepúlveda Orozco (2014), las cerámicas piezoeléctricas son materiales ferroeléctricos que presentan una polarización eléctrica espontánea. Este comportamiento se presenta principalmente en temperaturas inferiores a la temperatura de Curie, ya que a temperaturas mayores, el material pierde las propiedades piezoeléctricas.

Los rasgos generales de la fabricación de este tipo de sensor cerámico siguen el proceso de fabricación que inicia con la mezcla de polvos de cristales muy finos en proporciones específicas. Posteriormente, estos polvos son mezclados con un aglutinante orgánico y el resultado de dicha mezcla es dispuesto en formas específicas (discos, barras, placas, etc.), las cuales son sometidas a altas temperaturas durante un tiempo determinado en un proceso denominado “sinterización”, es decir que se hace una compactación basada en temperatura del polvo formado. Luego, se realiza el proceso de polarización de las cerámicas que se muestra con mayor detalle en la tabla 2.3 de la siguiente página.

Tabla 2.3

Polarización de las cerámicas piezoeléctricas

Orientación aleatoria de la dirección	
<p>El estado de la cerámica piezoeléctrica presenta una dirección de polarización de forma aleatoria.</p> <p>Si se aplica un esfuerzo, la suma de los desplazamientos de carga es cero. Bajo estas condiciones el material no exhibirá un efecto piezoeléctrico.</p>	
Orientación alineada de la dirección de polarización de la cerámica piezoeléctrica	
<p>Para obtener actividad piezoeléctrica, los dipolos deben primero ser orientados, lo que significa que posteriormente, la cerámica es expuesta a un fuerte campo eléctrico de corriente continua a una temperatura ligeramente por debajo de la temperatura de Curie.</p> <p>El resultado del efecto de la polarización se observa al tener una alineada dirección de polarización.</p>	
Polarización remanente de la cerámica piezoeléctrica	
<p>Al quitar el campo eléctrico, los dipolos no pueden volver fácilmente a su posición original, obteniéndose así la llamada "polarización remanente del material cerámico".</p> <p>El cuerpo cerámico se ha convertido en forma permanente en piezoeléctrico y, puede convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa.</p>	

Nota. Las figuras son de Sepúlveda Orozco (2014) y el texto de González et al. (2009)

2.2.3 Ingeniería inversa

El proceso común de ingeniería o "ingeniería directa" para la fabricación de un producto empieza con las especificaciones y exigencias iniciales del producto que se quiere elaborar. Posteriormente, se conceptualiza un diseño para que luego sea materializado en el producto final que puede tener la posibilidad de cumplir o no cumplir con las necesidades del cliente final.

Por el contrario, existe el concepto de "ingeniería inversa" que es definido por Ramos Acosta (2013) como el estudio o análisis un producto disponible en el mercado con el fin de conocer detalles de su diseño, construcción y operación. Se denomina

así porque se parte de un producto terminado, el cual se analiza minuciosamente con el objetivo de encontrar el porqué de cada detalle de construcción y funcionamiento, opuesto a los procesos de ingeniería los cuales inician con unas necesidades o requerimientos y finalizan con un producto.

Según Cruz Ocampo (2012), el uso de la ingeniería inversa se ha aplicado desde la revolución industrial. Como, por ejemplo, cuando un producto nuevo e innovador era presentado en el mercado por una empresa, los competidores de la misma se enfrentan ante la curiosidad de saber cómo fue construido dicho producto, para ello aplican técnicas de ingeniería inversa con el objetivo de descubrir los secretos que se esconden detrás del producto, y así poder recrear sus características y generar uno nuevo con características similares o superiores.

Se usa principalmente para tres fines como: duplicar y producir partes de un fabricante de piezas originales cuando el diseño no está disponible, reparar o reemplazar partes dañadas de un equipo cuando no se tiene conocimiento o no se dispone del diseño de las mismas, y, generar un modelo o prototipo basados en una parte existente para el análisis.

La ingeniería inversa se define como un método viable para crear un modelo virtual en 3D de una parte física ya existente para utilizar en diferentes softwares 3D como CAD, CAM o CAE (formaCAD Engineering & Consulting S.L., 2019), lo que lo hace ideal para diseño automotriz, aeronáutico, etc. También, es especialmente útil cuando se requiere trabajar con precisión, geometrías complejas, disminución de tiempo de desarrollo y, evitar ensayo y error como factores incidentes en el desarrollo de un producto (Betancur Rodríguez, 2011).

El fin es tener como base los principios y características de un objeto ya terminado para reconstruirlo como un modelo 3D que permita hacerle mejoras y en otros casos crear un nuevo objeto.

2.2.3.1 Escaneo 3D

En caso de querer replicar figuras de la realidad que son muy difíciles de modelar, el escaneo en tres dimensiones es lo más ideal para resolver el problema. El escáner 3D es

un dispositivo que analiza la superficie de un objeto para reunir los datos dimensionales y geométricos, con el fin de crear un modelo digital tridimensional (Pucp, s.f.).

2.2.3.2 Impresión 3D

La impresión en tres dimensiones se define como proceso por el cual se crean objetos físicos colocando un material por capas en base a un modelo digital (Autodesk Inc., 2019b) a partir de un diseño elaborado por un computador. El fin del uso de la tecnología es prototipar para hacer pruebas con usuarios y mejoras del diseño, así evitar costos futuros innecesarios en modificaciones.

Las impresiones pueden modificarse según las necesidades finales, tomando en cuenta características del filamento a utilizar, la ingeniería, el diseño industrial, la arquitectura, etc. Ya no solo se utiliza esta tecnología para objetos simples y cotidianos, sino que también puede servir en el ámbito de la medicina con la impresión de tejidos humanos y hasta órganos.

2.3 Glosario de términos

- **Huella ecológica:** Método de medición que analiza las demandas de la humanidad sobre la biósfera respecto a la capacidad regenerativa del planeta (Ministerio del Ambiente, 2012).
- **Energy Harvesting:** También denominado “cosecha de energía” es un campo de estudios que se basa en la extracción u obtención de energía presente en el ambiente para transformarla en una fuente eficiente y útil de energía eléctrica (Queccara Castilla, 2014).
- **Piezoelectricidad:** Fenómeno en el cual se genera electricidad en ciertos materiales sujetos a un esfuerzo mecánico. Además, estos materiales muestran el efecto inverso en el que cambian su forma bajo la influencia de un campo eléctrico (González et al., 2009).
- **CAD:** “Diseño Asistido por Computador”. Consiste en el uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas 2D o 3D de objetos físicos como una alternativa a los borradores

manuales y a los prototipos de producto (Siemens Industry Software Inc., 2019).

- **CAM:** “Manufactura Asistida por Computadora”. Consiste en el uso de aplicaciones de software de control numérico (NC) con el objetivo de crear instrucciones detalladas (código G) que impulsen las máquinas-herramienta de control numérico por ordenador (CNC) para las piezas de fabricación (Siemens Industry Software Inc., 2019b).
- **NC:** “Control Numérico”. Forma de automatización programable en la cual el equipo de procesamiento se controla a través de números, letras y otros símbolos (3DCADPortal, 2019).
- **CNC:** “Control Numérico Computarizado” A diferencia de una máquina convencional o manual, una computadora controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina (3DCADPortal, 2019).
- **Código G:** Nombre común del lenguaje de programación de las máquinas NC y CNC.
- **CAE:** “Ingeniería Asistida por Computador”. Consiste en el uso de software para simular el rendimiento con el objetivo de mejorar los diseños de los productos o de contribuir a la resolución de problemas de ingeniería para sectores muy diversos (Siemens Industry Software Inc., 2019c).
- **Amperaje:** Un amperio (A) es la unidad internacional para la medición de la corriente. Expresa la cantidad de electrones que pasan por punto en un circuito durante un tiempo determinado (Fluke Corporation, 2020a)
- **Voltaje:** Se mide en voltios (V), es la diferencia de potencial de una fuente de energía de un circuito eléctrico que mueve los electrones cargados (corriente) a través de un lazo conductor (Fluke Corporation, 2020b).
- **Potencia:** Se mide en vatios (W) y es una magnitud utilizada para cuantificar el consumo de energía eléctrica. Indica la cantidad de energía eléctrica transferida de una fuente generadora a un elemento consumidor por unidad de tiempo (Tarifas de Luz, s.f.).

CAPÍTULO III. INGENIERÍA DEL PROYECTO

En el siguiente capítulo se presentan las diferentes tecnologías existentes para la elaboración de sistemas de captación de energía a partir de fuentes externas, materiales piezoeléctricos y prototipado. Además, se describe el proceso de captación de energía piezoeléctrica del proyecto de investigación.

3.1 Tecnologías existentes

3.1.1 Sistemas de captación de energía

El concepto de *Energy Harvesting* como proceso de recuperación de diferentes tipos de energía que se encuentran en el entorno mediante sistemas de captación de energía que se explican a continuación.

Para obtener energía de los recursos naturales se requiere un medio para transformar la energía en electricidad (Ahmad & Hashim, 2011). Estos recursos que se encuentran naturalmente en el día a día se pueden observar en la figura 3.1 de la siguiente página, con la clasificación de las diferentes fuentes de energía que se pueden usar para la cosecha de energía y la forma de cómo obtener la energía, para su posterior acondicionamiento y almacenamiento. La clasificación se divide en cinco grupos: mecánico, bioquímico, térmico, magnético y radiante.

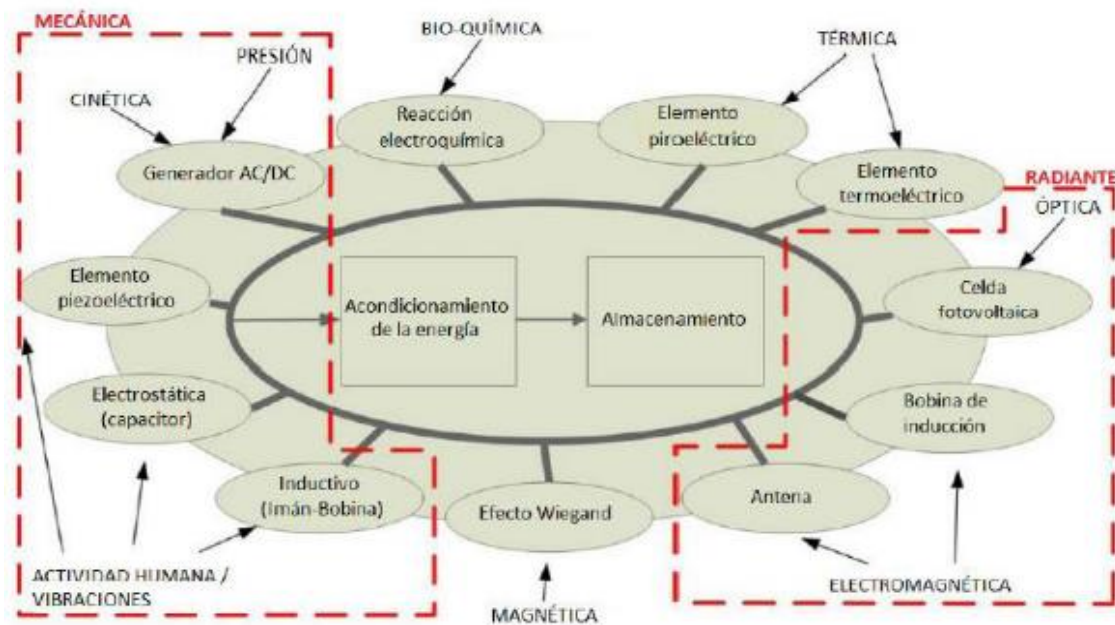
Según Sepúlveda Orozco (2014), dentro de los mecánicos se encuentran los que usan la presión, la cinética, las vibraciones y las actividades humanas como fuente principal de obtención de energía. Las fuentes de presión y de cinética son transformadas mediante generadores AC/DC, mientras que las actividades humanas y vibraciones mediante elementos piezoeléctricos, electrostáticos o inductivos.

Los magnéticos, por su parte, aprovechan el efecto Wiegand, el cual consiste en la conmutación de la magnetización de la zona central de un hilo ferromagnético cuando es sometido a un campo magnético externo intenso.

Por otro lado, los radiantes como su mismo nombre lo indica aprovechan la radiación tanto electromagnética como óptica para generar energía eléctrica a partir de inducción de bobinas y antenas, y celdas fotovoltaicas, respectivamente. Los térmicos usan elementos piroeléctricos y termoeléctricos para su generación. Por último, los bioquímicos lo hacen desde las reacciones electroquímicas.

Figura 3.1

Clasificación de los Energy Harvesting



De “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (Energy Harvesting) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar”, por E. Sepúlveda, 2014 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>)

3.1.1.1 Aplicaciones de sistemas de captación de energía

Independientemente de la clasificación a la cual pertenecen los *Energy Harvesting*, la gama de aplicaciones de estos sistemas pueden abarcar incontables posibilidades (Sepúlveda Orozco, 2014). Los ejemplos innovadores de la literatura revisada se presentan a continuación.

- Yamuna & Sundar (2014). **Design of piezoelectric energy harvester and storage devices**

Los autores utilizaron un acelerómetro para hacer vibrar cerámicas piezoeléctricas con ayuda de un *shaker* o agitador. Las cerámicas piezoeléctricas se montaron en un soporte con forma de viga que al vibrar produce tensión mecánica en la cerámica, que luego se convierte en energía eléctrica con ayuda de componentes electrónicos.

- Kumar (2015). **Energy collection via piezoelectricity**

El autor ideó un molino de viento piezoeléctrico que consiste en un ventilador con tres palas para capturar efectivamente el flujo del viento. Se conectó un brazo de palanca al rotor del ventilador del molino de viento con el fin de presionar los cristales piezoeléctricos con el movimiento del ventilador. La compresión constante de los cristales piezoeléctricos hace que se genere una gran cantidad de energía.

- Xie & Cai (2015). **An in-shoe harvester with motion magnification for scavenging energy from human foot strike**

Los autores explicaron que el desplazamiento permitido del talón del zapato en la dirección vertical es extremadamente pequeño. Por lo tanto, se empleó un mecanismo deslizante trapezoidal especial para amplificar el desplazamiento de un paso.

Para la elaboración del sistema, se utilizó un tren de engranajes para acelerar el movimiento que mueve un microgenerador de corriente alterna para producir electricidad. Se emplearon dos juegos de resortes para proporcionar una fuerza de restauración para el mecanismo deslizante trapezoidal que permitió a la cosechadora generar electricidad al caminar.

- Dewangan & Dubey (2017). **Design and implementation of energy harvesting system using piezoelectric sensor**

Los autores utilizaron la rueda libre de una bicicleta para conducir un motor que ejerce presión continua sobre cristales piezoeléctricos. El voltaje generado es muy

pequeño. Por esta razón, los autores utilizaron un amplificador para incrementar el voltaje y poder alimentar una batería recargable.

3.1.2 Materiales piezoeléctricos

Sepúlveda Orozco (2014) explicó anteriormente “los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de presentar una polarización eléctrica al generarle una deformación mecánica y viceversa, es decir, generan una deformación mecánica al aplicarle una carga eléctrica”.

Ibañez Garcia (2012) presenta las ventajas de utilizar materiales piezoeléctricos, la gran simplicidad del material, el tamaño pequeño, son de larga vida útil, reducen el peso de la batería y satisfacen determinadas aplicaciones como la carga de móviles, portátiles, tablets, etc.

Sin embargo, las desventajas que se deben de tener en cuenta son la poca electricidad que, generada la salida, y la agrupación de los sensores piezoeléctricos que optimice la producción de energía eléctrica. Las características mencionadas hacen que los materiales piezoeléctricos sean ideales para aplicaciones como los encendedores eléctricos, relojes de cuarzo y temporizadores.

Entre los materiales naturales más conocidos están el cuarzo, la turmalina y la sal de Rochelle. Mientras que, los artificiales más usados como el PVDF, PZT, AlN y ZnO fueron creados para tener más disponibilidad en el mercado y la mejorar la eficiencia de los naturales.

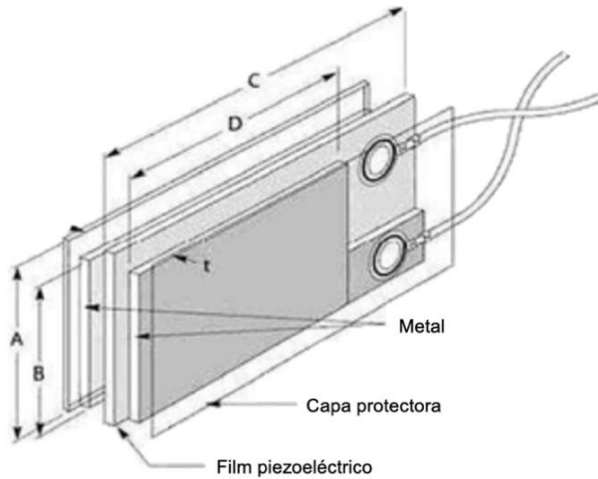
Por otro lado, Fernández Galeano (2018) comenta sobre “dos ejemplos de tipos de tecnologías de elaboración de sensores piezoeléctricos de tipo artificial para ciertas aplicaciones, estos son los sensores film de PVDF y los de diafragma cerámicos”. A continuación, se presentan las características y la configuración de ambos tipos de sensor.

- a) Los **sensores film de PVDF** sirven para medir vibraciones y fuerzas no muy grandes, ya que al ser láminas finas se someten a mucha deformación, tienen buena sensibilidad, son relativamente económicos, y son de muy poco grosor. En la figura 3.2 de la siguiente página, se aprecia un ejemplo de la estructura de un sensor film PVDF, la cual consta del film piezoeléctrico PVDF en el medio,

seguido de dos capas de metal como el zinc que sirven de electrodos y una capa protectora que puede ser plástico.

Figura 3.2

Partes de un sensor film de PVDF

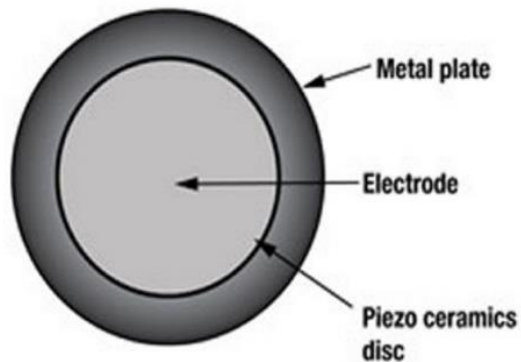


De “Numerical Simulation of Output Response of PVDF Sensor Attached on a Cantilever Beam Subjected to Impact Loading”, por Dung & Sasaki, 2016 (<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/601>)

- b) Los **sensores piezoeléctricos de diafragma cerámico** de uso general por su precio bastante económico. Están hechos de un material piezoeléctrico cerámico, una placa metálica y dos electrodos. Normalmente el material piezoeléctrico se encuentra entre una placa metálica que puede ser de latón y dos electrodos con un diafragma que permite la transferencia de la fuerza al material piezoeléctrico. En la figura 3.3 de la siguiente página, se pueden ver las partes del sensor de diafragma cerámico.

Figura 3.3

Partes de un sensor de diafragma cerámico



De “Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza”, por A. Fernández, 2018 ([https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández - Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández_-_Estudio_de_sensores_piezoeléctricos_en_aplicaciones_de_medición_de_fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y))

3.1.3 Prototipado

La elaboración de los prototipos de las plantillas se basó en el concepto de ingeniería inversa mediante el uso de un escáner 3D para poder experimentar con las dimensiones y características de una plantilla común. Para que luego, los prototipos se materialicen mediante la tecnología de impresión 3D.

3.1.3.1 Plantillas

Generalmente, se utilizan una gran diversidad de materiales con características viscoelásticas y de buenas propiedades mecánicas para la fabricación de plantillas. Entre los materiales más utilizados y accesibles del mercado se encuentra el poliuretano.

Perales Alcacio (2010) expone que, además, se necesitan de moldes y aditivos. Los aditivos sirven de agentes auxiliares para la síntesis del poliuretano. También, ayudan a ajustar la velocidad de reacción del poliuretano según la aplicación que se quiera. Los catalizadores son el ejemplo esencial de aditivos, los cuales son especialmente importantes en la reacción de formación de espumas, donde se debe equilibrar la reacción de espumado con la reacción de polimerización, de tal modo que ambas sean simultáneas.

El proceso de producción de plantillas de poliuretano sigue la norma ASTM F 1614-99 A para calzado de seguridad. El proceso inicia con la mezcla de los

reactivos isocianato-P y Polioliol-R con el catalizador amina terciaria a 2 500 rpm en un molde de resina. El molde fue previamente calentado a 50°C. La mezcla se dejó secar a temperatura ambiente y se sacó del molde, obteniendo así la plantilla de poliuretano.

3.1.3.2 Ingeniería inversa

Según Betancur Rodríguez (2011), la ingeniería inversa permite la captura, representación y reproducción de modelos de productos a partir de la manipulación de información tridimensional en un computador. El proceso de ingeniería inversa implica la medición de un objeto físico para describir su geometría con una precisión requerida y así lograr una reproducción del objeto que mantenga en todo momento sus características funcionales.

El método consiste en la captura y procesamiento de la información geométrica en 3D de un objeto físico. El proceso de captura de información geométrica se conoce como digitalización 3D, y el procesamiento de datos se denomina reconstrucción de superficies.

En la digitalización se pueden utilizar calibradores y galgas para medir la geometría si esta no es muy compleja, pero si la geometría presenta un alto grado de complejidad es necesario aplicar técnicas más avanzadas que utilizan escáner láser, ultrasonido, reconocimiento de imágenes o digitalizadores de contacto.

a) Técnicas avanzadas de digitalización 3D

La digitalización 3D corresponde al proceso de captura de la información geométrica de un objeto físico mediante herramientas tecnológicas de adquisición de datos en masa como escáneres laser, digitalizadores ópticos, brazos de contacto, palpadores, mesas de medición de coordenadas y tomógrafos axiales computarizados. Estos sistemas tienen como características fundamentales que pueden medir objetos en tres dimensiones y almacenan la información geométrica capturada en un ordenador para su posterior manipulación.

La selección del sistema de digitalización depende principalmente de los requerimientos de precisión, velocidad, características del material, condiciones de la superficie, tamaño del objeto y condiciones de montaje. Por otro lado, según sus características tecnológicas pueden tener variaciones en costo, tamaño, versatilidad y velocidad de captura.

Las tecnologías a tener en consideración se describirán a continuación. Se tendrá un mayor detalle con la tecnología de escaneo 3D que es la elegida para el proyecto de investigación.


Escaneo 3D

Según Creaform (2019a), un escáner 3D mide la geometría de un objeto físico real, proporcionando una copia digital exacta de casi cualquier cosa. Esta copia digital se puede exportar como un archivo de malla poligonal y utilizarse en procesos asistidos por ordenador diferentes, como el modelado en 3D, el diseño asistido por ordenador (que también se conoce como CAD), la fabricación asistida por ordenador o la impresión en 3D.

Las técnicas más utilizadas de escaneo 3D son la fotogrametría, escaneado láser y escaneado por luz estructurada. Estas tres técnicas se detallan a continuación en la tabla 3.1.

Tabla 3.1

Técnicas de escaneo 3D

Fotogrametría	
<p>Se obtiene un modelo 3D a partir de varias fotografías hechas desde todos los ángulos para obtener la mayor información del objeto.</p> <p>También, se agrega más posiciones de la cámara a la rutina de visión estéreo regular, lo que lo convierte en un digitalizador de tecnología 3D más completo.</p>	

(continúa)

(continuación)

Escaneado láser

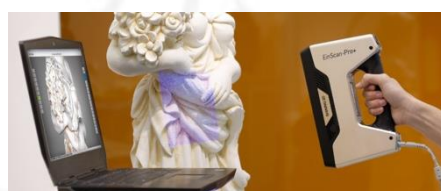
Tipo más escaneo 3D más utilizado en el mercado.

Una malla 3D se origina a partir de las coordenadas medidas de los ángulos generados al emitir una luz láser sobre el objeto



Escaneado por luz estructurada

El objeto a escanear recibe un patrón de luz que se deforma según su forma. Los puntos del modelo se crean utilizando la posición conocida de la cámara, y la información del patrón de luz que golpea el objeto.



Nota. Adaptado de *Tipos de Escaneo 3D: Conoce la ciencia detrás de la digitalización tridimensional*, por JG Cistem SA, 2019 (<https://tresde.pe/tipos-de-escaneo-3d-conoce-la-ciencia-detras-de-la-digitalizacion-tridimensional/>)

Además del escaneo 3D, otras tecnologías de adquisición de datos en masa como el uso de la mesa de medición de coordenadas y palpadores, el digitalizador óptico y TAC cuyas siglas significan “Tomografía Axial Computarizada”. Los detalles se pueden ver en la siguiente tabla 3.2.

Tabla 3.2

Tecnologías de adquisición de datos en masa

Equipo	Principio	Precisión	Velocidad	Aplicaciones
Mesa de medición de coordenadas y palpadores	Palpado mecánico de las piezas por medio de una probeta sujeta a un brazo o ejes móviles	Buena	Baja	Piezas con figuras geométricas de poca forma libre
Digitalizar óptico	Tomas por medio de cámaras usando fotogrametría	Buena	Alta	Piezas de cualquier tamaño principalmente formas libres
TAC	Tomografías Axiales Computarizadas, rayos X	Media	Media	Medicina

Nota. De “Ingeniería Inversa Aplicada: metodología y aplicaciones industriales”, por M. Betancur, 2011 (https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/9080/Mario_BetancurRodriguez_2011.pdf?sequence=2)

b) Reconstrucción de superficies

La reconstrucción de superficies toma la información 3D adquirida, y por medio de herramientas CAD genera un modelo computacional tridimensional que puede ser manipulado de acuerdo a las necesidades de diseño, manufactura y análisis (Betancur Rodríguez, 2011). Esto se logra mediante la aplicación de sistemas CAD, CAM y CAE especializados para la ingeniería inversa. Se tienen como ejemplo los softwares Geomagic, VRMesh, CopyCAD, y VXelements. Los detalles se observan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3

Softwares de ingeniería inversa

Software	Función
Geomagic	Plataforma de software para resolver el proceso de escaneo, diseño, manufactura e inspección ^a
VRMesh	Manejo de mallas (mesh) y superficies trianguladas, usadas para crear automáticamente modelos 3D desde nubes de puntos o datos escaneados ^b
CopyCAD	Programa que permite trabajar con nubes de puntos y convertirlas a geometría CAD resolviendo rápidamente los detalles de aperturas que se presenten ^c
VXelements	Plataforma de software 3D simple, potente y totalmente integrada que funciona en sinergia completa con todas nuestras tecnologías de medición 3D ^d

Nota. ^{a,b,c} 3DCADPortal (2020). ^d Creaform (2019a)

Impresión 3D

Por último, para la manifestación concreta de la investigación se utilizó la tecnología de impresión 3D para la fabricación de los prototipos propuestos más adelante. Existen varios tipos de impresión 3D actualmente en el mercado. Se tomó como referencia las tecnologías más utilizadas para la impresión en tres dimensiones. El primero es la fabricación con filamento fundido que ha sido elegido para este proyecto de investigación, luego se tiene la estereolitografía y el sinterizado selectivo por láser. Se detalla cada tipo de impresión en la tabla 3.4 de la siguiente página.

Tabla 3.4

Tipos de impresión 3D

Fabricación con filamento fundido (FFF)	
<p>El filamento termoplástico se calienta y se extruye en coordenadas de x e y a través del cabezal de extrusión, mientras que la superficie de impresión va bajando el objeto capa por capa en la dirección z.</p> <p>Ejemplos: MakerBot Replicator y Ultimaker 2^a</p>	
Estereolitografía (SLA)	
<p>Una capa de resina líquida fotosensible a un rayo láser UV para que se endurezca y se solidifique. Una vez que el láser recorre una capa de resina en el patrón deseado, este comienza a endurecerse. Acto seguido, la plataforma de impresión del modelo, situada en el tanque líquido de la impresora, baja una capa y el láser comienza a formar la siguiente capa. Cada capa se construye sobre la anterior.</p> <p>Ejemplos: Ember y Formlabs Form^b</p>	
Sinterizado selectivo por láser (SLS)	
<p>Se utiliza material en polvo para la impresión. Se usa un láser para sinterizar selectivamente una capa de gránulos que une el material para crear una estructura sólida.</p> <p>Cuando el objeto está completamente formado, se deja enfriar en la máquina antes de retirarlo.</p> <p>Ejemplos: Fuse 1 y Kit Sintratec^c</p>	

Nota. ^a JMG Soluciones S.A.S (2018). ^b 3DNatives (2017). ^c Proto Labs (s.f.)

c) **Software de impresión 3D**

El modelado 3D consiste en utilizar software para crear una representación matemática de un objeto o forma tridimensional. El objeto creado se denomina modelo 3D y se utiliza en distintas industrias (Autodesk Inc., 2019). Los tipos de

software se dividen en categorías como juegos, cine, televisión y efectos visuales; diseño industrial y de productos; e, impresión 3D.

Los softwares más usados son MakerBot Print, Rhino 3D, AutoCAD y SolidWorks. A continuación, se detallarán las características de los softwares en la tabla 3.5.

Tabla 3.5

Ejemplos de software de modelamiento 3D

Software	Características
MakerBot Print	Software que optimiza el proceso de impresión 3D para cualquier flujo de trabajo. Permite descubrir, preparar, administrar y compartir impresiones 3D ^a
Rhino 3D	Ilimitadas herramientas de modelado 3D y precisión necesaria para el diseño ^b
AutoCAD	Crear y editar geometría en 2D y modelos en 3D con sólidos, superficies y objetos de malla ^c
SolidWorks	Conceptualiza, crea, valida, comunica, gestiona y transforma innovadoras ideas en fantásticos diseños de productos ^d

Nota. ^a MakerBot Industries (2020). ^b Robert McNeel & Associates (2019). ^c Autodesk Inc. (2019b). ^d Dassault Systemes SolidWorks Corporation (2019)

d) Materiales de impresión 3D

Los materiales necesarios para la impresión varían según el diseño a imprimir. Si son objetos simples, se pueden utilizar materiales duros como por ejemplo el PLA y el PETG. En cambio, si se requiere del uso de materiales flexibles, se puede utilizar el ASA, ABS, PP, Nylon, etc. Por otro lado, también se pueden usar materiales como plata, titanio, acero, cera, fotopolímeros y policarbonato (3Ders, 2019).

Los materiales más utilizados en la industria son ABS, PLA, ASA y material flexible. Es importante mencionar que antes de que estuvieran disponibles el TPE y el TPU para impresión en 3D, se utilizaban PLA flexibles o suaves para imitar las cualidades del caucho. Pero estos son de menor calidad en términos de desgaste y propiedades elásticas que el TPE y el TPU (Beamler, 2020). Para más detalle, en la tabla 3.6 de la siguiente página, se pondrán la descripción, ventajas, desventajas y el uso de los materiales.

Tabla 3.6*Materiales de impresión 3D*

Material	Descripción	Ventaja	Desventaja	Usos
ABS ^a	Acrilonitrilo Butadieno Estireno	Reutilizable Alta resistencia	No es biodegradable Se encoge en contacto con al aire	Carrocería, automóviles, electrodomésticos, carcasas de los móviles
PLA ^b	Ácido Poliláctico	Biodegradable Fácil impresión Impresión resultante fácil de lijar y cortar	Elevada velocidad de enfriamiento Se deteriora al contactar con el agua	Empaquetados, industria textil, industria médica
ASA ^c	Acrilonitrilo Estireno Acrilato	Resistencia a los rayos UV Resistencia al agua Rígido	Impresión en máquinas de cámaras cerradas o en espacio abierto (emisiones del estireno)	Piezas finales para maquinaria, prototipos duraderos
Material flexible ^d	Fabricados de TPE (Termoplástico Elastómero) o TPU (Poliuretano Termoplástico)	Desarrollo de objetos deformables	Tener cuidado con el extrusor en casos de atascos	Industria de la moda

Nota. ^{a, b, c}3DNatives (2019b). ^dFilament2Print (s.f.)

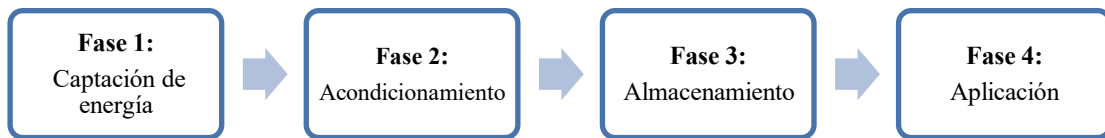
3.2 Descripción del proceso

El *Energy Harvesting* a partir del calzado es un área que ha sido de interés durante mucho tiempo. A medida que la electrónica se vuelve cada vez más pequeña, la tendencia reciente en la tecnología portátil es avanzar hacia baterías más pequeñas o sistemas sin baterías y aprovechar la energía necesaria del cuerpo humano o sus movimientos (Hegde et al., 2016).

El término se combinó con la tecnología *wearable* para el proyecto de investigación y se propuso como base para la elaboración de un sistema de captación de energía piezoeléctrica con aplicación en plantillas. Es decir, se puede recuperar la presión que se pierde al caminar con ayuda un sistema de *Energy Harvesting* que presenta “una arquitectura de sistemas de cosechamiento de energía de cuatro fases fundamentales para poder captar y almacenar energía” según Casanova Gómez (2013). La estructura se describe en la figura 3.4 de la siguiente página, esta presenta cuatro fases fundamentales que son captación de energía, acondicionamiento, almacenamiento y aplicación.

Figura 3.4

Fases de la descripción del proceso de cosecha de energía



3.2.1 Fases de cosechamiento de energía

La cosecha de energía se divide en las siguientes fases que abarcan el sistema de captación de energía, es decir, qué fuente externa se usó para la recuperación de energía; el acondicionamiento de la energía generada por el sistema de captación a partir del uso de componentes electrónicos; el almacenamiento de la energía en baterías; y la aplicación de prototipos de plantillas de zapatillas.

- El **sistema de captación de energía** es el sistema que se encarga de captar cualquier tipo de energía (solar, electromagnética, termoeléctrica, piezoeléctrico, radiofrecuencia, etc.). Por lo tanto, es una de las partes fundamentales del diseño, ya que se encarga de alimentar al resto de las partes del sistema.
- Para el **acondicionamiento** de la energía es necesario un bloque intermedio que se encargue de la administración de la energía. Se trata de un sistema que adapta y convierte la energía (rectificador, convertidor, procesador, etc.).
- El **almacenamiento** de la energía a almacenar en las baterías y el suministro de potencia regulada varían según la energía y potencia específica a utilizar. Hoy en día existen varias alternativas para almacenar la energía en los sistemas de cosecha de energía siendo los más empleados son los supercondensadores y las microbaterías.
- La **aplicación** del uso final que se le va a dar a la energía producida por los sistemas de cosecha de energía puede estar formada por cualquier dispositivo que no necesite una potencia de alimentación muy elevada.

3.2.1.1 Fase 1: Sistema de captación de energía

En la primera fase de la cosecha de energía, se exponen sobre los diferentes sensores piezoeléctricos utilizados en investigaciones para la creación del sistema de captación de energía, qué sensor piezoeléctrico se eligió para el proyecto y cómo estos fueron soldados. Se utilizó la energía de la presión que se ejerce al caminar para la cosecha de energía. Para la captura de esta energía se pueden utilizar sistemas electromagnéticos, piezoeléctricos, electrostáticos, etc. (Casanova Gómez, 2013).

Según la literatura revisada es importante tener en cuenta que, entre las fuentes de energía provenientes de las actividades humanas, se pueden aprovechar tres tipos de excitaciones que son producidas por el pie. La primera es el pulso de la aceleración al golpear el talón, la segunda la aceleración causada por el movimiento de la pierna al caminar y la tercera, la fuerza de compresión que actúa sobre el zapato debido al peso de la persona (Fan et al., 2017). Cumplir con estas tres condiciones puede tener bastantes complicaciones tanto con la estructura como el costo de fabricación de piezas a medida. Por esta razón, se optó por solo aprovechar la compresión que se da al caminar.

a) Selección de los sensores piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos son sensores generadores con los que se puede medir fuerza (Fernández Galeano, 2018) y los tipos de sensores pueden variar según la aplicación. En la investigación, se probarán la fuerza de las pisadas que se dan al caminar para accionar el sensor y generar energía.

Según la literatura revisada, los autores tomaron en cuenta los diversos tipos de componentes piezoeléctricos en sus investigaciones que se especifican a continuación, en la tabla 3.7 de la siguiente página, según aplicación y autor.

Tabla 3.7*Tipos de sensores piezoeléctricos según trabajo de investigación*

Artículo científico o tesis	Tipo de sensor piezoeléctrico
Desarrollo de un dispositivo colector de energía que utiliza materiales piezoeléctricos ^a	Parche piezoeléctrico PZT P-876
Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza ^b	- Sensor film de PVDF - Sensor cerámico PZT
Diseño de un colector de energía piezoeléctrico mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar ^c	Sensor modelo PZT Cymbal
Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte ^d	Piezocerámico PZT

Nota. ^a Ahmad & Hashim (2011). ^b Fernández Galeano (2018). ^c Sepúlveda Orozco (2014). ^d Palomino Vera (2016)

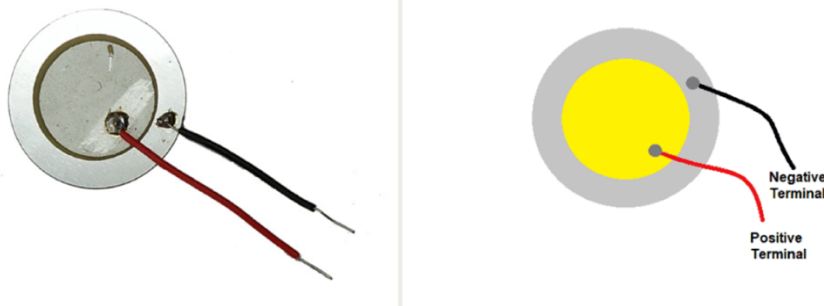
Ahmad & Hashim (2011) pegaron un parche piezoeléctrico en la superficie de una lámina de zinc y la ubicaron en la zona de los dedos del pie de la plantilla de calzado para producir la mayor cantidad de energía al caminar o correr. Fernández Galeano (2018) estudió dos tipos de sensores piezoeléctricos, el piezofilm PVDF y el sensor de diafragma cerámico PZT, para la medición de fuerzas. Sepúlveda Orozco (2014) optimizó el diseño del mecanismo del sensor tipo PZT Cymbal para mejorar su desempeño en generación de energía limpia. Por último, Palomino Vera (2016) utilizó los piezocerámicos PZT de forma circular conocidos en el mercado como “zumbadores” para la generación de energía eléctrica al hacer una rutina de ejercicio en una bicicleta elíptica.

Se encontró como una opción más económica y de mayor disponibilidad en el mercado, la utilización de sensores piezoeléctricos PZT de diafragma cerámico. Además, es un cerámico que tiene ventajas sobre los otros piezoeléctricos. El voltaje que produce bajo presión es 10 veces mayor que los otros, tiene alta resistencia a la compresión, es resistente a la corrosión, prácticamente inmune al cambio de temperatura, ruido eléctrico o humedad y además de bajo costo. También, se fabrican de varias formas de acuerdo a la aplicación.

El material del PZT propiamente se encuentra en forma de disco entre dos contactos metálicos (electrodos) donde se produce el voltaje cuando se les aplica una fuerza perpendicular al disco. El contacto metálico de la base es ligeramente mayor que el contacto de la parte superior del PZT. Esto permite soldar los cables en la cara visible de los electrodos, como se muestra en la figura 3.5.

Figura 3.5

Sensor piezoeléctrico PZT de diafragma cerámico

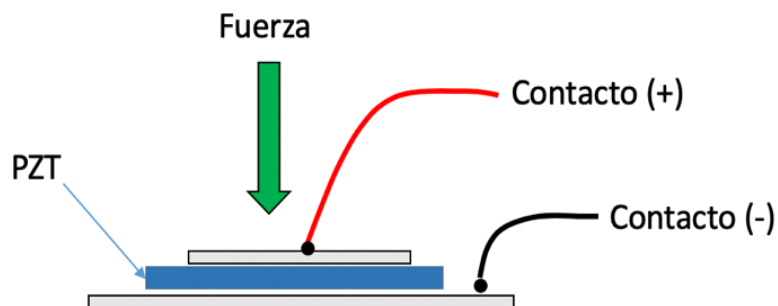


De *Piezoelectric Sensor*, por Components 101 (2020) (<https://components101.com/sensors/piezoelectric-sensor>)

En la figura 3.6, se puede observar que cuando se presiona el disco con una fuerza perpendicular, el electrodo superior toma la carga positiva, por ello se suelda al cable de color rojo, mientras que el contacto de la parte inferior, acumula la carga negativa, y es soldado al cable de color negro.

Figura 3.6

Posición de los contactos en el sensor piezoeléctrico PZT de diafragma cerámico



Fernández Galeano (2018) también indica la importancia de la revisión de la hoja de especificaciones técnicas (data sheet) del sensor a utilizar, ya que según la aplicación se tiene que considerar los parámetros a analizar y la sensibilidad del sensor. Según el data sheet del sensor piezoeléctrico elegido para el proyecto de investigación, el sensor es un componente de sonido de características de sonido claro, ultra delgado y de bajo peso, no genera ruido, altamente confiable, y, por último, consume poco voltaje. Las aplicaciones ideales son relojes, calculadora, cámaras digitales y alarmas (Murata Manufacturing Co., 2020).

b) Soldado de los sensores piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos fueron soldados en paralelo. Un circuito en paralelo es aquel esquema en el que la corriente eléctrica se distribuye en diversas ramificaciones a través del montaje (Mateu & Moll, 2006). Es decir, que los elementos se ubican en paralelo para generación de carga, al conectar los terminales de la siguiente forma: positivo con positivo y negativo con negativo. De este modo, el voltaje generado se mantiene constante en todo el sistema.

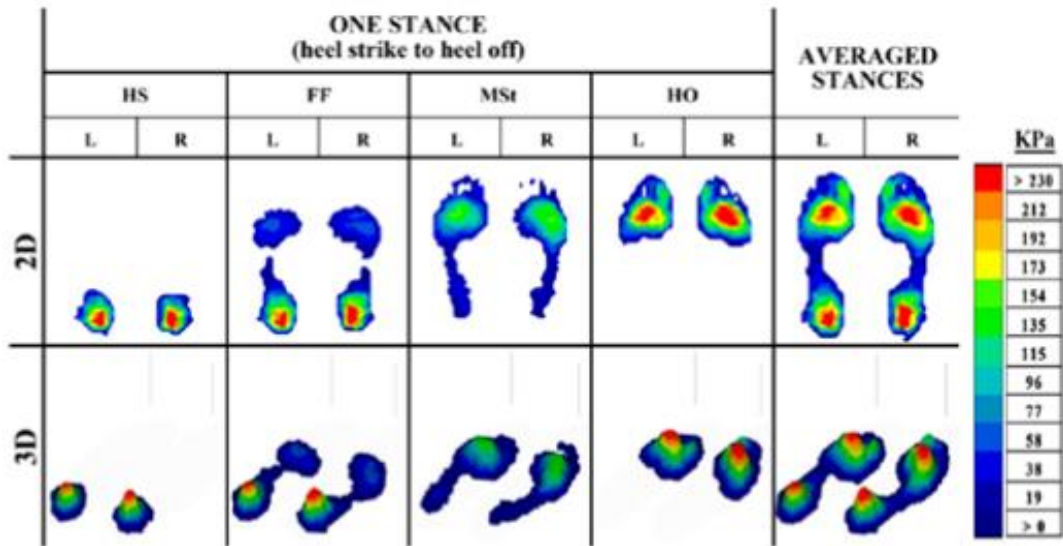
También, se tomó en cuenta la ilustración de un mapa de presión plantar durante una fase de postura (golpe de tacón a talón) de un individuo sin ningún tipo de patología que se tiene en la figura 3.7 de la siguiente página, para la ubicación ideal de los sensores piezoeléctricos.

En el mapa, se observa la cantidad de presión que se ejerce mientras que un individuo camina desde la presión que se ejerce en el talón al pisar hasta la elevación de este para dar el siguiente paso. Según la tabla de KPa¹ de la derecha, se deduce que la zona roja, ubicada en el centro del antepié y del talón, es la que presenta mayor presión y que la de azul más oscuro presenta menos presión.

¹ Unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades

Figura 3.7

Mapa de la presión plantar al caminar



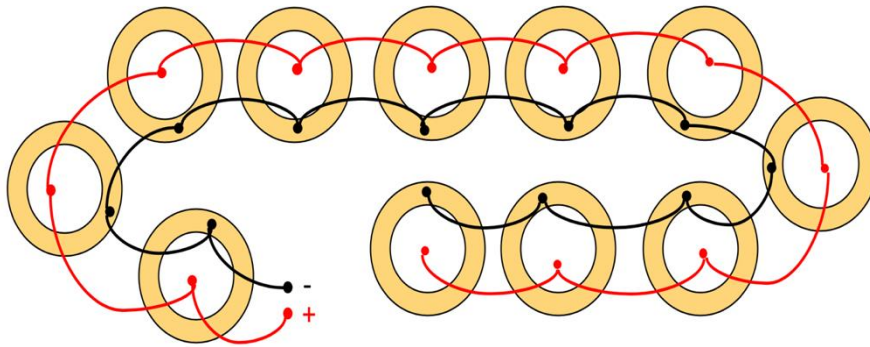
De “A comparative review of footwear-based wearable systems”, por N. Hegde et al., 2016 (<http://www.mdpi.com/2079-9292/5/3/48>)

El diseño propuesto en la investigación consiste en once discos PZT soldados en paralelo. Se tomó como referencia las zonas rojas de la presión plantar de la anterior figura 3.7, en las que se observa mayor presión. También se consideró que el arco del pie, dependiendo el pie izquierdo o derecho, no logra presionar los sensores piezoeléctricos al momento de pisar el circuito.

Antes de empezar a soldar los sensores piezoeléctricos, es importante identificar la parte negativa y positiva de los sensores que emiten voltajes de salida negativo y positivo, respectivamente. En la figura 3.8 de la siguiente página, se observan los sensores piezoeléctricos que han sido soldados según el contacto positivo o negativo.

Figura 3.8

Sistema piezoeléctrico conectado en paralelo (pie izquierdo)



Si tomamos el caso del pie izquierdo como ejemplo para el inicio del soldado de los sensores piezoeléctricos, las conexiones empiezan en la parte posterior del arco del pie y van sucesivamente hasta terminar en la parte inferior de la planta del pie. Los cables restantes fueron posteriormente conectados a un protoboard para la simulación de la pisada de una persona.

Los sensores piezoeléctricos fueron conectados en paralelo, por ello, la corriente que generan en los cables son la suma de las corrientes de los discos. Si todos reciben la misma fuerza, el voltaje producido es el mismo que el de un disco, pero la corriente es once veces la que genera un disco.

3.2.1.2 Fase 2: Acondicionamiento

En la segunda fase, se analizaron los componentes electrónicos que se necesitan para acondicionar la energía generada por los sensores piezoeléctricos en el sistema de captación de energía detallado en la primera fase. El acondicionamiento requiere de un convertidor de energía que transforme la corriente alterna en continua.

La energía que se recupera no está lista para ser conectada directamente a los dispositivos eléctricos, debido a tres características. En primer lugar, es que la tensión de salida no está regulada y no puede emplearse directamente para alimentar circuitos eléctricos. En segundo lugar, puede que no proporcionen una potencia continua e ininterrumpida. Por último, generan una potencia media muy baja (Casanova Gómez, 2013).

Bajo la acción de la fuerza ejercida por las pisadas, los sensores piezoeléctricos PZT generan un voltaje variable, o alterno con valores positivos y negativos. Este voltaje pasa a la etapa de rectificación, que convierte este voltaje en uno variable, pero sólo de valores positivos (Sepúlveda Orozco, 2014).

Antes de detallar el circuito de acondicionamiento de la energía a partir de la piezoelectricidad, se hizo una prueba rápida de funcionamiento del soldado de los sensores piezoeléctricos al prender un diodo LED.

- **Encendido del diodo LED**

Las siglas de un diodo LED significan “Diodo Emisor de Luz”, este es un tipo de diodo muy usado como indicador de que un circuito está activo. Se siguió la ruta del diagrama de bloques mostrado en la figura 3.9, que empieza con simulación de una pisada al presionar el sistema de once sensores piezoeléctricos.

Figura 3.9





Diagrama de bloques para el encendido del diodo LED



Además, se requiere de un puente de diodos, cuya la función es la de rectificar la energía generada para que esta solo tengas valores positivos. Este componente electrónico tiene más detalle en la parte de carga de la unidad de almacenamiento.

En la tabla 3.8 de la siguiente página, se tienen las imágenes referenciales y especificaciones de cada uno de los materiales a utilizar en el armado del circuito. Para asegurarnos que el sistema de sensores piezoeléctricos genere energía, se probó con un pequeño sistema para verificar la continuidad del circuito. Se utilizaron un diodo LED de rojo, cables macho a macho para conectar los cables soldados con los sensores piezoeléctricos y los demás componentes electrónicos en el protoboard.

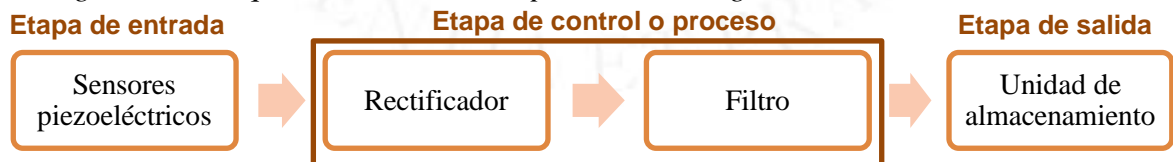
Tabla 3.8*Materiales a utilizar en el encendido del diodo LED*

Material	Imagen referencial	Voltaje de operación	Información adicional
Diodo LED ^a		1.8 V	Diámetro: 5 mm
Cables macho a macho ^b		-	Longitud: 20 cm
Puente de diodos ^c		1,000 V	Modelo: KBP310 3 A
Protoboard ^d		-	Dimensiones: 16,5 x 5,5 x 0,8 cm

Nota. ^{a, b, c, d} Naylamp Mechatronics (s.f.-a)

- **Carga de una unidad de almacenamiento**

Luego de probar que el circuito esté activo, la energía se almacena siguiendo la ruta general elaborada tomando como referencias a diversos autores. Esta ruta se detallará en la figura 3.10 con un diagrama de bloques, en la que se pueden observar todos los componentes electrónicos a utilizar y las tres etapas de entrada, control o proceso, y salida.

Figura 3.10*Diagrama de bloques del sistema de captación de energía*

La **etapa de entrada** está compuesta por el sistema de sensores piezoeléctricos, que se encargan de captar la energía generada por la presión que se da al moverse de un lado a otro. La salida de estos sensores es una señal alterna que cambia de sentido constantemente, cuyo voltaje se puede utilizar para dispositivos

electrónicos de bajo consumo de energía, si primero se convierte en señal digital (Kumar, 2015).

Por esta razón, en la **etapa de proceso o control** se integran componentes electrónicos encargados de adaptar la energía generada a uso común. Primero, la energía que se ha recuperado pasa por un punte de diodos. Este puente está compuesto por cuatro diodos que son rectificadores individuales que forman un circuito rectificador de onda completa encargados de conseguir que la señal eléctrica proporcionada por los elementos piezoeléctricos solo tenga valores positivos (Jiménez Martínez et al., 2015).

Seguido de un condensador con la función de actuar como filtro para que el voltaje directo producido se mantenga constante (Maiwa, 2016) y se evite las variaciones de tensión (Jiménez Martínez et al., 2015). Terminando con la carga de la batería, cuyos detalles del almacenamiento de energía de la **etapa de salida** se verán en la fase 3 en el siguiente punto. Cabe resaltar que, dependiendo de la unidad a almacenar en la etapa de salida, el orden puede cambiar y también se pueden adicionar más componentes.

3.2.1.3 Fase 3: Almacenamiento

Luego de la corrección de la energía generada, en la **etapa de salida** se carga una batería. La etapa de almacenamiento tiene dos funciones principales: almacenar energía en las baterías y suministrar la potencia regulada a la aplicación. Hoy en día existen varias alternativas para almacenar la energía en los sistemas de cosecha de energía siendo los más empleados son los supercondensadores y las microbaterías (Casanova Gómez, 2013). Según la potencia, la energía que se requiera y el sistema de cosecha de energía, se puede requerir de tres tipos de unidad de almacenamiento como los condensadores, supercondensadores y las baterías.

El primer tipo de unidad es el condensador o capacitor que es un dispositivo que almacena energía. Este consiste en dos placas de material conductor (generalmente un metal fino) ubicado entre un aislador de cerámica, película, vidrio u otros materiales, incluso aire (Fluke Corporation, 2021).

El segundo, el supercondensador, también llamados ultracapacitores tiene un funcionamiento muy similar al de un condensador a gran escala. Sin embargo, el nombre de supercondensador indica su mayor capacidad (medida en Faradios), miles de veces mayor que la capacidad de los condensadores comunes (Twenergy, 2019).

Finalmente, la batería es un dispositivo que convierte la energía química contenida en sus materiales activos directamente en energía eléctrica por medio de una reacción electroquímica de oxidación-reducción (Mezei, 2011).

Se tomaron en cuenta los componentes de almacenamiento según los autores de las investigaciones. Los diversos tipos de componentes se especifican en la tabla 3.9 de la siguiente página, según artículo científico y autores.

Ahmad & Hashim (2011) probaron con diferentes fuentes de almacenamiento entre condensadores, supercapacitores y baterías. Según los resultados favorables obtenidos, los autores escogieron la batería de 40 mAh a 1.2 V a ser cargada al caminar y correr a una determinada velocidad.

Fernández Galeano (2018) aplicó fuerza con las pesas de precisión sobre el sensor piezofilm para cargar un capacitor de 100 nF. De mismo modo, se aplastó el sensor de diafragma con las pesas para la carga de un condensador de 100 nF.

Sepúlveda Orozco (2014) probó cargar un condensador de 470 μ F y una batería de 20 mAh con el colector piezoeléctrico modificado.

Palomino Vera (2016) utilizó una batería de 4 000 mAh a 6 V a cargar con el movimiento de una bicicleta elíptica como fuente de poder para encender 3 bombillas LED de 5W.

Tabla 3.9*Tipos de unidades de almacenamiento según trabajo de investigación*

Artículo científico o tesis	Componente electrónico de almacenamiento
Desarrollo de un dispositivo colector de energía que utiliza materiales piezoeléctricos ^a	Batería NiMH 40 mAh a 1.2 V
Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza ^b	- Condensador 100 nF
Diseño de un colector de energía piezoeléctrico mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar ^c	- Condensador 470 μ F - Batería NiMH 20 mAh
Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte ^d	Batería 4 000 mAh a 6 V

Nota. ^a Ahmad & Hashim (2011). ^b Fernández Galeano (2018). ^c Sepúlveda Orozco (2014). ^d Palomino Vera (2016)

3.2.1.4 Fase 4: Aplicación

La última fase se divide en la elaboración de cuatro prototipos. El primer prototipo se hizo a partir de un diseño de la plataforma Thingiverse. El segundo prototipo se elaboró a partir del concepto de ingeniería inversa. El tercero, partió de la modificación del parámetro de impresión del segundo prototipo. Por último, el cuarto utiliza el segundo prototipo y componentes electrónicos montados en un protoboard.

A medida que los componentes electrónicos se vuelven cada vez más pequeños, la tendencia reciente en tecnología *wearable* es avanzar hacia baterías más pequeñas o sistemas sin batería y aprovechar la energía que necesita el cuerpo humano o sus movimientos (Hegde et al., 2016). La aplicación *wearable* a utilizar es de una plantilla en la que se montó el sistema piezoeléctrico, el cual aprovecha el movimiento diario que se da al caminar. Los prototipos de la plantilla se elaboraron con la tecnología de diseño 3D y se imprimieron con el uso del filamento flexible PLA.

Se escogió la impresora MakerBot Replicator 2x porque es ideal para prototipado 3D profesional y generalmente no necesita de trabajo pos-producción (LS3D, 2020). También, es versátil en cuanto al uso de tipos de materiales de impresión y es muy fácil de usar. En el anexo 1, se detallan las especificaciones de la impresora.

Se escogió el filamento flexible PLA principalmente porque opción amigable con el medio ambiente, ya que está hecho de un derivado del maíz a comparación de otros filamentos que provienen del petróleo. También, es el mejor y el más consistente de los materiales para las impresoras MakerBot. Por otro lado, la impresión de este material es lo más parecido a las características de comodidad, flexibilidad y de tacto blando de la plantilla de calzado deportivo. Las especificaciones se tienen en el anexo 2.

Diseño y desarrollo de los prototipos de la plantilla piezoeléctrica

A continuación, se escribe sobre los prototipos de plantillas elaboradas con el filamento flexible PLA y que fueron impresas en 3D. Según los resultados del capítulo 4, los prototipos que fueron modificados y mejorados. Los detalles se encuentran a continuación.

a) Primer prototipo

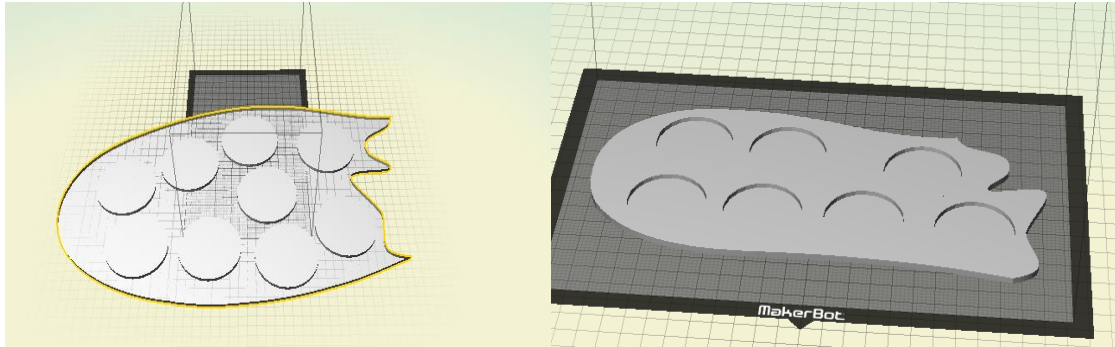
Se utilizó la plataforma Thingiverse de MakerBot, que es un sitio web en el que se comparten diseños de piezas 3D, para la búsqueda de plantillas ya hechas anteriormente.

Se encontró el diseño del prototipo de aplicación médica utilizado para tener un mejor diagnóstico del paciente al monitorear su pisada y así poder mejorar su forma de caminar. Los sensores piezoeléctricos tienen la función de medio para extraer información la caminata de la persona evaluada. Luego, se registra la información de sus pasos y se localiza qué parte del pie presenta algún problema.

No se contó con información importante sobre diseño, como las dimensiones de la plantilla, qué tipo de sensores se utilizaron y el diámetro de estos, qué material e impresora 3D se utilizó, etc. El diseño que se puede observar en la figura 3.11 de la siguiente página.

Figura 3.11

Diseño del primer prototipo de la plantilla



b) Segundo prototipo

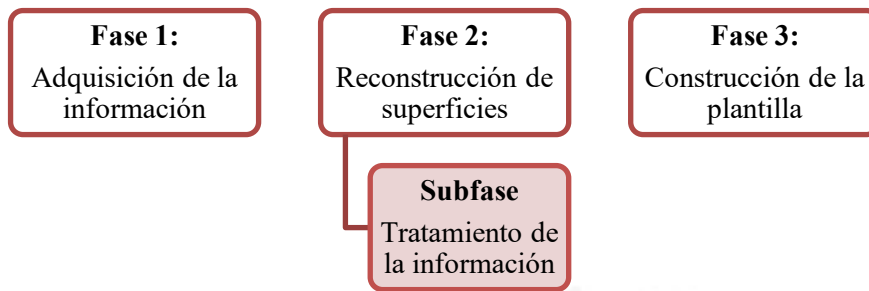
Para la elaboración del segundo prototipo, se tomó como referencia el concepto de ingeniería inversa definido como la herramienta que permite la captura, representación y reproducción de modelos de productos a partir de la manipulación de información tridimensional en un computador. El proceso de ingeniería inversa implica la medición de un objeto físico para describir su geometría con una precisión requerida y así lograr una reproducción del objeto que mantenga en todo momento sus características funcionales (Betancur Rodríguez, 2011).

Tomando como referencias a Cuesta et al. (2014) y Betancur Rodríguez (2011), el proceso de ingeniería inversa se detalla de forma genérica. La metodología en las aplicaciones de ingeniería inversa se puede dividir en tres fases: una primera fase de adquisición de la información geométrica de la pieza o digitalizado 3D, una segunda fase de tratamiento de la información y una tercera de reconstrucción de superficies mediante sistemas CAD, CAM y CAE.

Se consideraron ambas propuestas para definir las etapas de ingeniería inversa del proyecto de investigación, que constan en las tres que se detallan en la figura 3.12 de la siguiente página.

Figura 3.12

Fases de ingeniería inversa para la elaboración del segundo prototipo



Se proponen tres fases principales y una subfase. La primera fase principal es la de adquisición de información geométrica o digitalización, en la que se captura información geométrica del objeto físico. En la segunda etapa, esta información sirvió para reconstruir la superficie escaneada y generar una malla poligonal. Se mejoró la información obtenida mediante la subfase de tratamiento de la información geométrica. Por último, el resultado sirvió para la elaboración del prototipo en la tercera fase de construcción de la plantilla. El detalle se muestra a continuación.

- **Fase 1: Adquisición de la información geométrica**

El proceso de adquisición de información geométrica de una pieza se obtiene al capturar puntos de una o varias pasadas de un sensor láser para crear una “nube de puntos”. Esto se logró con ayuda de un escáner láser.

Se escaneó el pie de una persona con el fin de adquirir la información geométrica, y así poder trabajar con las medidas reales y la forma del pie. Se utilizaron el escáner 3D HandyScan 700 y el software VXelements.

El **HandyScan 700** cuenta con dos cámaras de los que salen 14 láseres que se intersectan y, forman una malla poligonal. Para que la malla poligonal se pueda formar, se necesita colorar superficies reflectantes llamados “targets” o “blancos de posicionamiento” donde se requiera escanear. Las especificaciones de del escáner 3D HandySCAN se muestran en el anexo 3.

Por otro lado, el **software Vxelements** es una plataforma de software 3D simple, potente y totalmente integrada que funciona en sinergia completa con de

tecnologías de medición 3D. Este presenta tres módulos de adquisición, ingeniería inversa e inspección (Creaform, 2020). El módulo a utilizar es el VXscan.

La adquisición de la información geométrica se detalla a continuación en la tabla 3.10 que inicia con la colocación de las superficies reflectantes en el suelo para el inicio del escaneo del pie.

Tabla 3.10

Fase 1: Adquisición de la información geométrica

Colocación de superficies reflectantes

Se colocaron los targets en la parte superior del pie, en una parte del talón y por encima del tobillo. También se pusieron targets en el suelo para identificar un plano de corte, el cual sirve como referencia para escanear únicamente el pie.



(continúa)

(continuación)

Escaneo 3D

Se escanearon el pie, la canilla y pantorrilla.



Generación de superficies

El resultado de la primera fase es una superficie con la información geométrica de la zona escaneada del pie, canilla y pantorrilla. Esta información se transformó posteriormente y sirvió de base para la elaboración del segundo prototipo.

- **Fase 2: Reconstrucción de superficies**

La segunda fase de reconstrucción de superficies utiliza toda la información geométrica tomada de las fase de adquisición de información para mejorarla y manipularla según las necesidades finales, con ayuda de programas CAD. Estas importante que las superficies que se generen deben estar correctamente ajustadas, con buena continuidad y con bordes bien definidos (Cuesta et al., 2014).

Los sistemas de escaneo láser capturan los datos geométricos de nube de puntos y la conectividad entre estos puntos mediante las mallas poligonales de triángulos. La malla poligonal de triángulos almacena la información geométrica de cada punto (x, y, z) (Betancur Rodríguez, 2011). La “nube de puntos” es conjunto de puntos distribuidos no uniformemente sobre la superficie y sin existir un borde claramente definido (Cuesta et al., 2014)

Es decir, que en esta etapa se recupera la información obtenida con el escaneo en tres dimensiones de la primera fase y, se mejora y modifica de tal forma que se pueda reconstruir la forma real del pie de una persona con ayuda de softwares CAD.

Se utilizó el módulo **VXmodel** también de la plataforma VXelments que es un software de pos-tratamiento y ofrece las herramientas necesarias para finalizar los datos de escaneo 3D de la manera más rápida y sencilla para pasar de escaneados 3D a cualquier software de CAD o de impresión 3D (Creaform, 2019b).

También, se utilizó el software **Geomagic Freeform** que combina el modelado en arcilla con las ventajas del diseño digital al identificar y corregir de forma rápida cualquier problema de fabricación que se pueda presentar (Artec Europe, 2019).

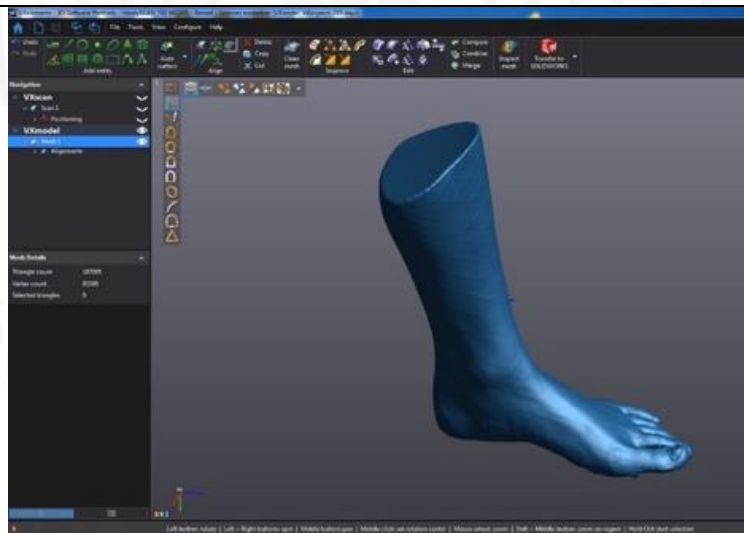
La mejora y modificación de la información se logra en la subfase de tratamiento de información geométrica como se detalla en la tabla 3.11.

Tabla 3.11

Fase 2: Reconstrucción de superficies

Generación de la malla poligonal

Se generó la malla poligonal del pie y de la parte inferior de la pierna, obtenida después del escaneo. Se puede observar que la superficie del pie no está bien definida y, presenta superficies ajenas al objeto digitalizado^a



Subfase: Tratamiento de la información geométrica

Es necesario hacer algunos tratamientos de las nubes de puntos con el objeto de prepararlas para la reconstrucción o generación óptima de la superficie, mejorando así la información al lograr la reducción de ruido. De esta forma, existe una triangulación que conecta los puntos correctamente y se tiene una malla única que describe el objeto^a

(continúa)

(continuación)

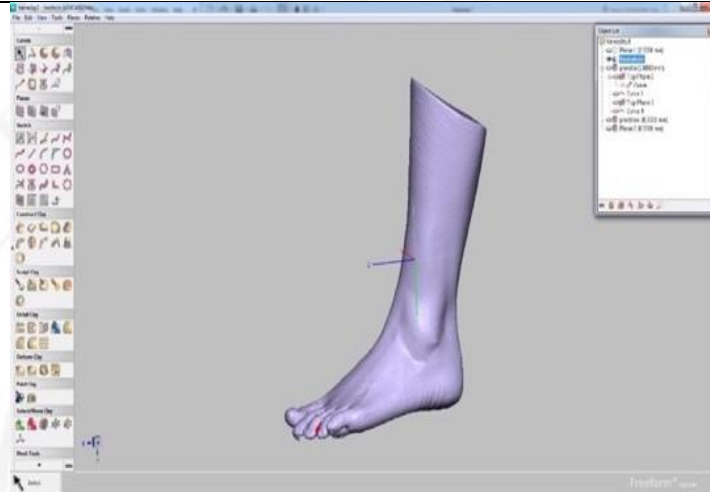
Filtrado

El filtrado de la nube se hace para eliminar puntos erróneos claramente visibles que se encuentran fuera de la superficie de la pieza. Estos fueron seleccionados y eliminados manualmente ^b

Generación de un cuerpo sólido

El software **Geomagic Freeform** se utilizó para hacer mejoras más específicas de malla poligonal al crear un cuerpo sólido que sea más fácil de trabajar según las necesidades requeridas.

El proceso pos-escaneo empieza al pasar la malla poligonal obtenida anteriormente a un cuerpo sólido, como paso previo para su modificación posterior.

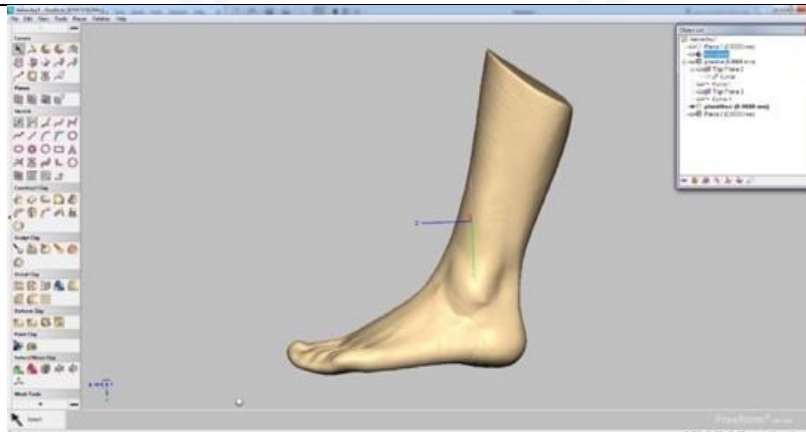


Modelado en arcilla

En el mismo software, se convirtió el cuerpo sólido a modo arcilla.

Rellenado de los dedos de pie

Los dedos del cuerpo sólido se rellenaron con la función Esculpir para obtener una superficie uniforme y evitar así las curvaturas innecesarias de los dedos del pie que puedan afectar al diseño posterior de la plantilla.



Nota. ^a Rodríguez (2011). ^b Cuesta et al. (2014).

- **Fase 3: Construcción de la plantilla**

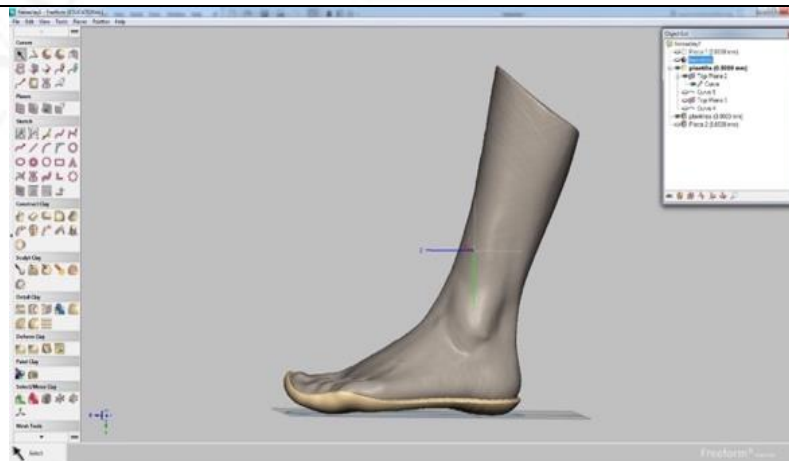
El cuerpo sólido tratado anteriormente, se utilizó como molde para la elaboración de la plantilla. Se hicieron modificaciones como extrusión de la base del pie, formación de superficies independientes, proyección al plano y dibujo de círculo, huecos y surcos. Los detalles se encuentran en la tabla 3.12.

Tabla 3.12

Fase 3: Construcción de la plantilla

Extrusión de la base del pie

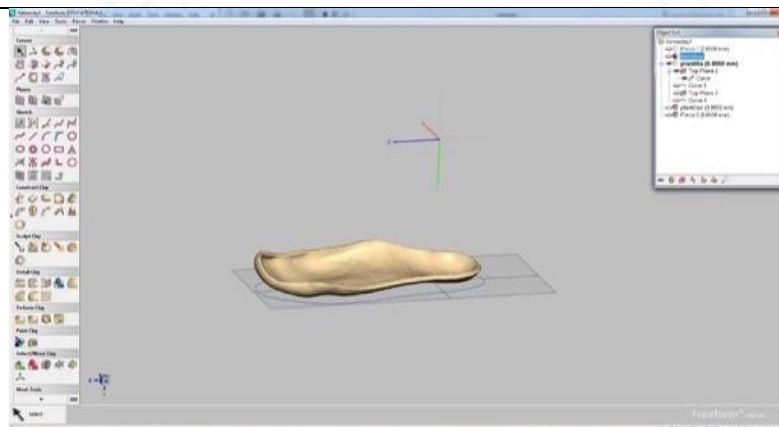
Se hizo la extrusión del escaneo obtenido en la fase 2 para obtener el molde de la plantilla. Se utilizó el comando Curve y se mantuvo presionado con el comando Fitting para dibujar el contorno de la plantilla en la superficie de la planta del pie del modelado 3D. La extrusión fue de 3 a 5 mm.



Formación de superficies independientes

Se formaron las superficies independientes que son el molde inferior y el escaneo del pie. Estas superficies se separaron con el comando Boolean Remove para poder obtener solo la base de la plantilla. El comando elegido remueve una figura de otra.

Este molde va a servir como referencia para la base de la plantilla.

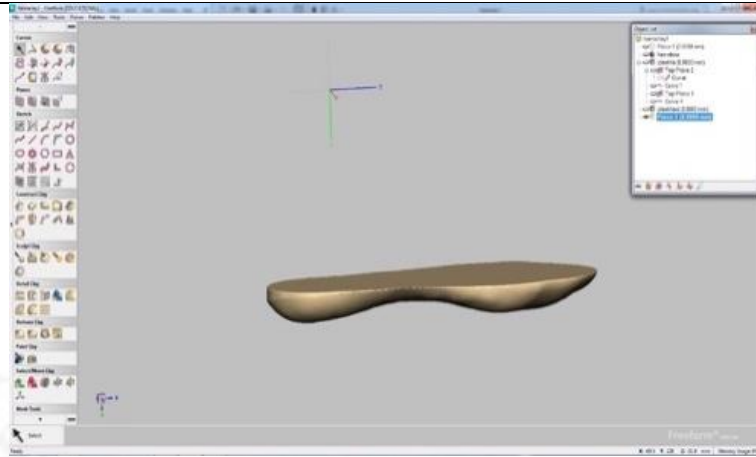


(continúa)

(continuación)

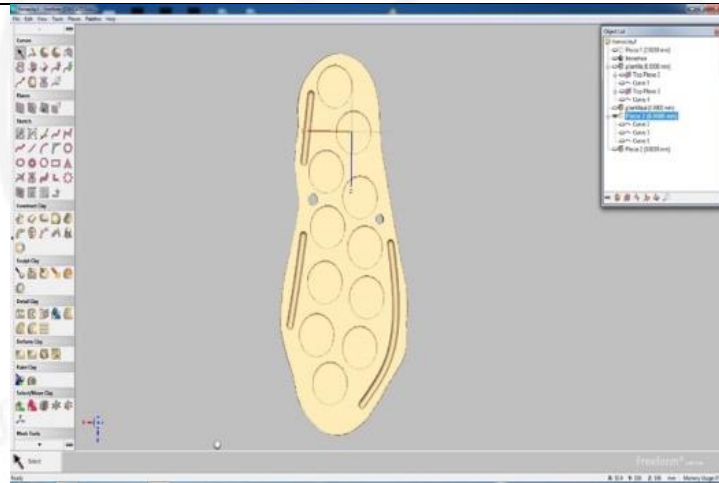
Proyección al plano

Las curvas escaneadas de la planta del pie que fueron proyectadas a una superficie plana con ayuda de la herramienta Proyectar Superficie a Plano.



Dibujo círculos, huecos y surcos

Se dibujaron once círculos de 27.5 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor para la ubicación de los sensores piezoeléctricos. También, se hicieron dos huecos con la opción Extruir para poder conectar los cables con el protoboard. Por último, con la opción Pipe se hicieron surcos de 3 mm de ancho.

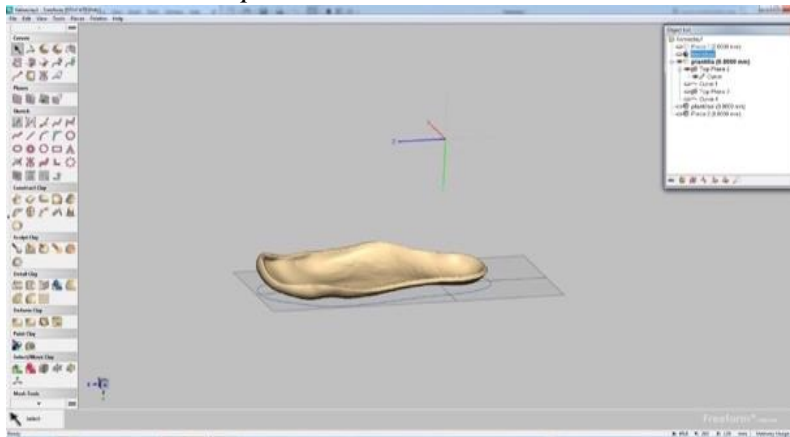


c) **Tercer prototipo**

Se modificaron los parámetros de impresión para la elaboración del tercer prototipo. Se probó una nueva configuración en los parámetros de impresión del diseño de la base extruida de la plantilla que se puede ver en la figura 3.13 de la siguiente página, obtenida anteriormente en la formación de superficies independientes.

Figura 3.13

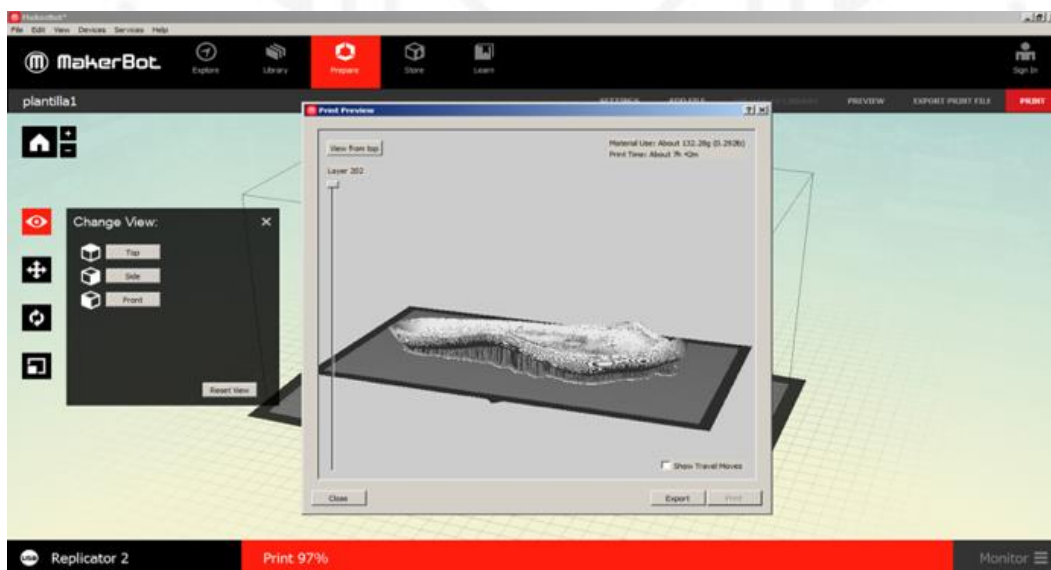
Base extruida del pie



Teniendo en cuenta que no se obtuvo una plantilla maleable con el resultado del segundo prototipo, la opción Infill Density fue modificada de 10% a 5%. Este parámetro establece la densidad de la estructura interna de soporte del material impreso. A mayor porcentaje de densidad, se obtiene un objeto más duro (MakerBot Industries, 2019). El diseño antes de imprimir de la nueva configuración se observa en la figura 3.14.

Figura 3.14

Diseño impresión del tercer prototipo



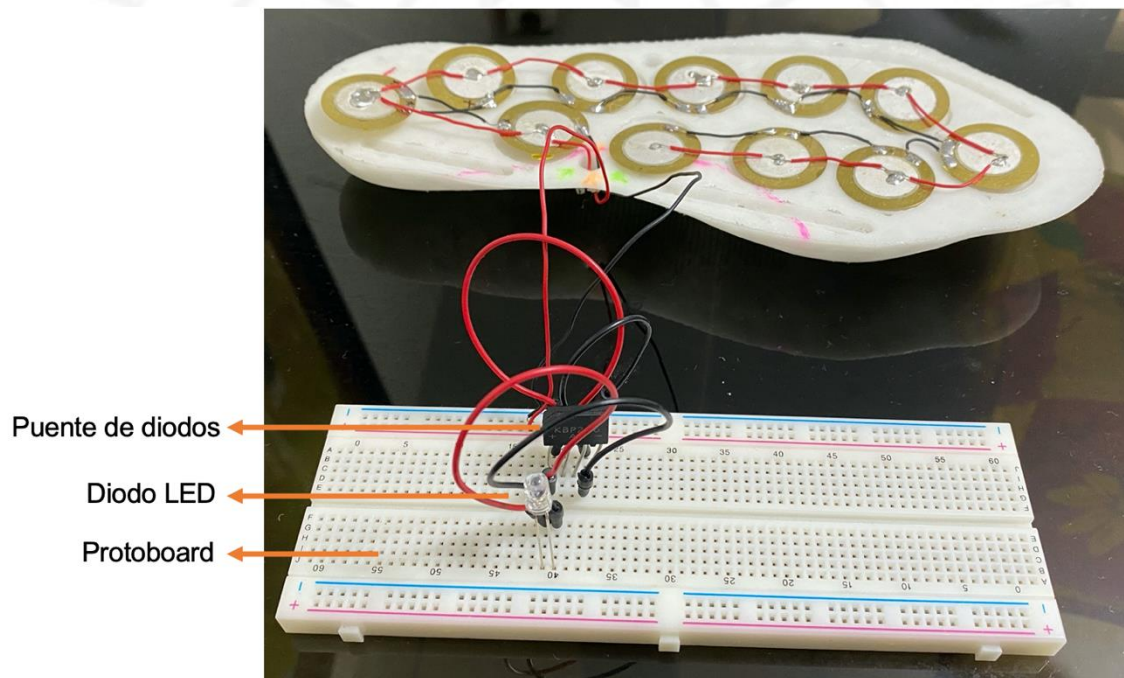
d) Cuarto prototipo

Por cuestiones técnicas y de tiempo, el cuarto prototipo está conformado por el segundo prototipo, los sensores piezoeléctricos y, un protoboard que tiene la función de conectar y desconectar componentes electrónicos sin la necesidad de que estos estén soldados, con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento del circuito. Lo que quiere decir que los todos los componentes electrónicos, incluyendo los sensores piezoeléctricos, se han conectado con cables al protoboard para la realización de una prueba experimental.

Como se puede observar en la figura 3.15, se tienen los sensores piezoeléctricos conectados entre sí en paralelo por cables de color ojo y negro que representan la parte positiva y negativa, respectivamente.

Figura 3.15

Cuarto prototipo listo para probar



CAPÍTULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se revisan los resultados experimentales del desarrollo de los prototipos de la plantilla y del sistema de captación de energía. El cuarto prototipo (que incluye el circuito eléctrico) se puso a prueba con el objetivo de verificar que el sistema de captación propuesto funcione.

4.1 Diseño y desarrollo de los prototipos de la plantilla

Los resultados de la impresión 3D de los tres prototipos se presentan a continuación. Se tomó en cuenta qué tan flexible es el prototipo luego de la impresión, de tal forma que se asemeje lo más posible a esta principal característica de una plantilla de calzado deportivo.

4.1.1 Primer prototipo

Solo se imprimió la división de la parte del talón del primer prototipo elaborado a partir del diseño de la plataforma Thingiverse. La impresión duró 2 horas y 5 minutos, y se gastó 37 gramos de filamento flexible PLA. El resultado se puede observar en la figura 4.1.

Figura 4.1

Impresión 3D del primer prototipo (parte talón)



Se obtuvo un resultado de textura dura y moderadamente flexible al doblar. Por otro lado, el mal acabado de impresión no permite distinguir los espacios para los sensores piezoeléctricos. Además, la escala del diseño no era la correcta para la ubicación de los sensores piezoeléctricos, y también, se desconocían las dimensiones de los sensores que se usaron para el diseño. Por estas razones, se optó por seguir las fases de la metodología de ingeniería inversa para el diseño del segundo prototipo.

4.1.2 Segundo prototipo

Siguiendo con la estructura de la ingeniería inversa, en la figura 4.2 se tiene la impresión acabada del segundo prototipo que presenta las dimensiones de 23.5 cm de largo que va acorde con las medidas de aproximadamente 24.2 cm de una plantilla de calzado de talla 37.5 (Adidas, 2017). La impresión tomó 6 horas y se gastó 105 gramos de material flexible PLA.

Figura 4.2

Dimensiones del segundo prototipo



Se obtuvo un resultado de textura dura y suave que no es flexible al doblar y, que tiene un mejor acabado en comparación con el primer prototipo. Se pueden observar los bordes bien definidos de los espacios para la ubicación de los sensores piezoeléctricos. Sin embargo, estos no pueden ser insertados debido a la rigidez de la estructura.

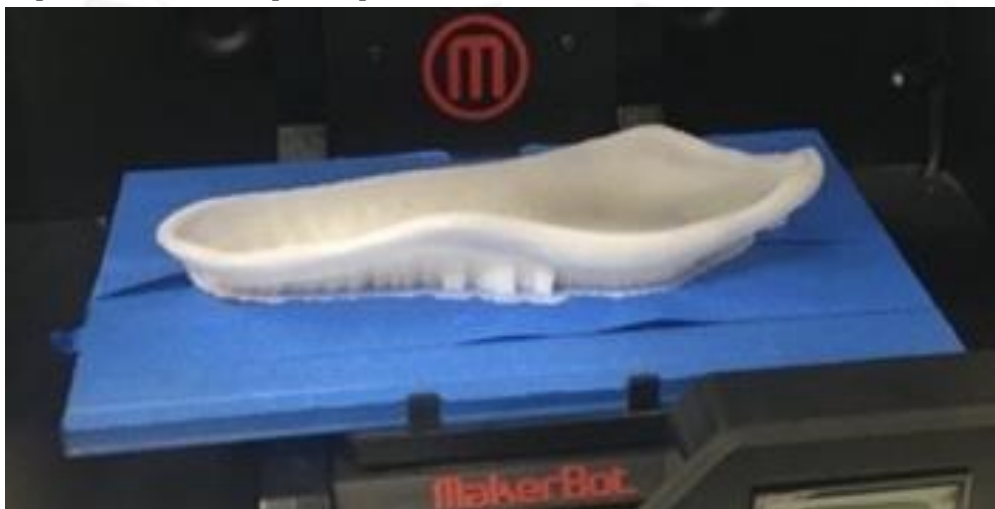
También, se observan surcos en los bordes de la plantilla en los que se esperaba poner los cables para tener un mejor orden. Estos no se pueden utilizar, debido a que las conexiones podrían verse afectadas al doblarse.

4.1.3 Tercer prototipo

Para la elaboración del tercer prototipo se probó con la modificación de uno de los parámetros de la impresión con la finalidad de que el prototipo tenga más flexibilidad como una plantilla de calzado deportivo. Se necesitaron de 132.28 gramos y 7 horas con 42 minutos para la impresión que se puede observar en la figura 4.3.

Figura 4.3

Impresión del tercer prototipo



La estructura es un poco más flexible que el segundo prototipo mas no cumple con lo requerido. Se considera este prototipo como una cierta mejora en cuanto flexibilidad. Sin embargo, por razones prácticas, solo se trabajará con el segundo prototipo.

4.2 Sistema de captación de energía

El sistema de captación de energía piezoeléctrica se probó como parte del cuarto prototipo. Solo se pudieron hacer dos pruebas experimentales por la pandemia del COVID-19. Por esta razón, los datos presentados de la carga de la unidad de almacenamiento se basaron en resultados experimentales de investigaciones de diversos

autores.

4.2.1 Cuarto prototipo

El cuarto prototipo está compuesto por el segundo prototipo, los sensores piezoeléctricos, protoboard y los componentes electrónicos. La primera prueba que se hizo fue la de medir la señal eléctrica al presionar uno de los once sensores piezoeléctricos, utilizando un osciloscopio digital. La segunda prueba fue de pisar el cuarto prototipo para encender un diodo LED, demostrando que el circuito está activo y que genera energía

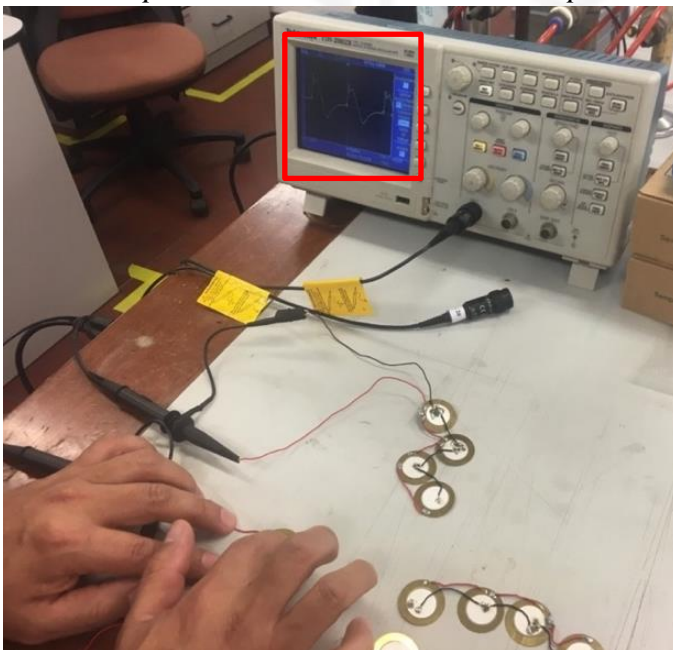
4.2.1.1 Señal eléctrica del sistema piezoeléctrico

Para conocer la forma y amplitud de la señal eléctrica del sistema de captación piezoeléctrico, se utilizó un osciloscopio digital, cuyas especificaciones se muestran en el anexo 4.

El sistema de captación de energía del arreglo de sensores piezoeléctrico se conectó al osciloscopio digital. Al presionar los sensores del sistema piezoeléctrico, se generó un cambio en la señal como se observa en la figura 4.4. La señal eléctrica que proporcionan los sensores piezoeléctricos es alterna, es decir que oscila en el tiempo.

Figura 4.4

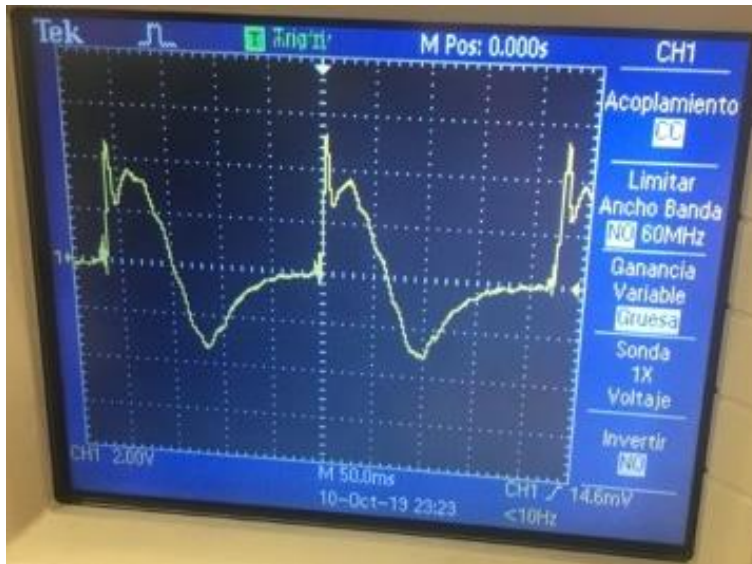
Prueba de presión de un sensor del sistema piezoeléctrico



En la figura 4.5, se observa con mayor detalle que la señal generada oscila entre valores positivos y negativos. Los valores picos se encuentran en aproximadamente -2.5 y 5 V cada vez que se presionaron los sensores piezoeléctricos.

Figura 4.5

Señal eléctrica producida al presionar los sensores piezoeléctricos del sistema

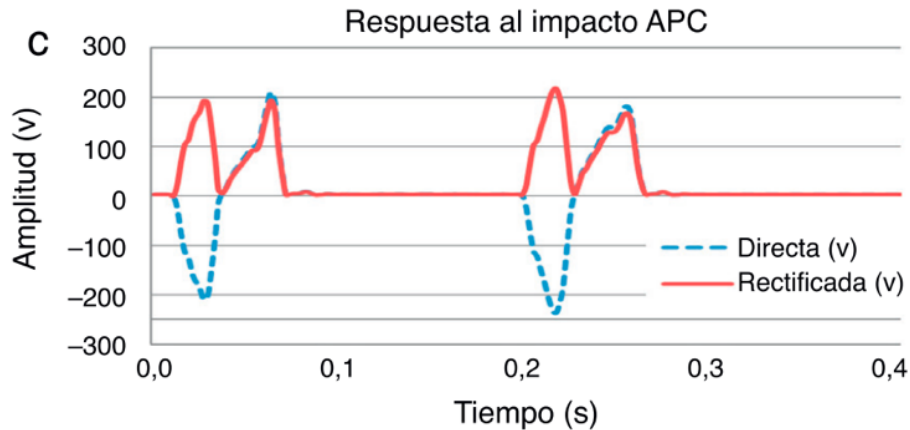


Por otro lado, Jiménez Martínez et al. (2015) muestra en la figura 4.6 de la siguiente página, el comportamiento de la señal obtenida del impacto de un bimorfo² marca APC (American Piezo Ceramics) como parte del sistema de captación según la arquitectura del circuito común para excitaciones mecánicas por impacto. El resultado presenta como señal inicial al trazo discontinuo de color azul. Este se refiere a la corriente alterna generada que presenta picos positivos y negativos.

² Estructura tipo cantiléver o en voladizo que consta de dos capas piezoeléctricas

Figura 4.6

Respuesta al impacto del bimorfo marca APC



De “Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting”, por F. Jiménez et al., 2015 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317515000862>)

Si comparamos los resultados de las figuras 4.5 y 4.6, el sistema piezoeléctrico propuesto por la investigación presenta el mismo comportamiento según la literatura, el cual representa valores pico positivos como negativos cada vez que se presiona el sensor piezoeléctrico.

Por la coyuntura actual del país, solo se pudo hacer esta prueba experimental en el laboratorio de ingeniería eléctrica. Lo ideal hubiera sido continuar con la etapa de rectificación, en la cual la señal (trazo discontinuo de color azul) se corrige mediante un puente de diodos, permitiendo así la rectificación a solo valores positivos (trazo continuo de color rojo), como se puede ver en la figura 4.6.

Además, es importante el uso de un capacitor en la etapa final para mantener constante el valor del voltaje obtenido, evitando así variaciones que puedan dañar la unidad de almacenamiento.

Considerando lo descrito anteriormente, el voltaje emitido por el arreglo piezoeléctrico al pisarlo fue de aproximadamente 5 V, ya que los sensores piezoeléctricos al estar soldados en paralelo, mantienen el voltaje constante en todo el sistema.

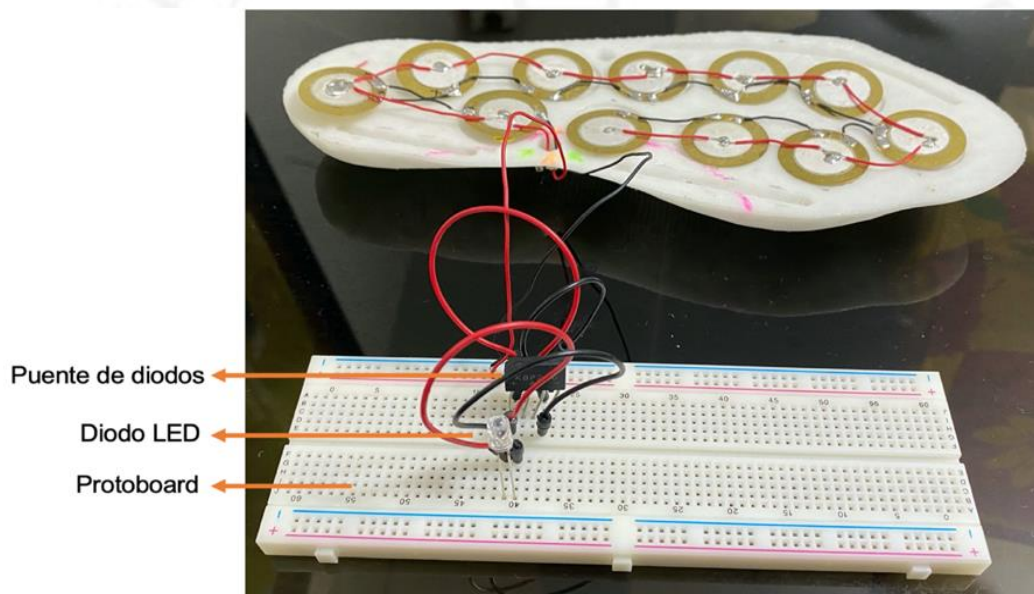
4.2.1.2 Encendido diodo LED

La segunda prueba experimental que se hizo fue del encendido del diodo LED. El voltaje generado se midió con un multímetro digital, cuyas especificaciones se encuentran en el anexo 5.

Como se detalló en la fase 3 de acondicionamiento del sistema de captación de energía, un diodo LED de color rojo se encendió con el circuito compuesto por los sensores piezoeléctricos, puente de diodos, cables y un protoboard, que se vuelven a observar en la figura 4.7.

Figura 4.7

Cuarto prototipo para la prueba de encendido del diodo LED

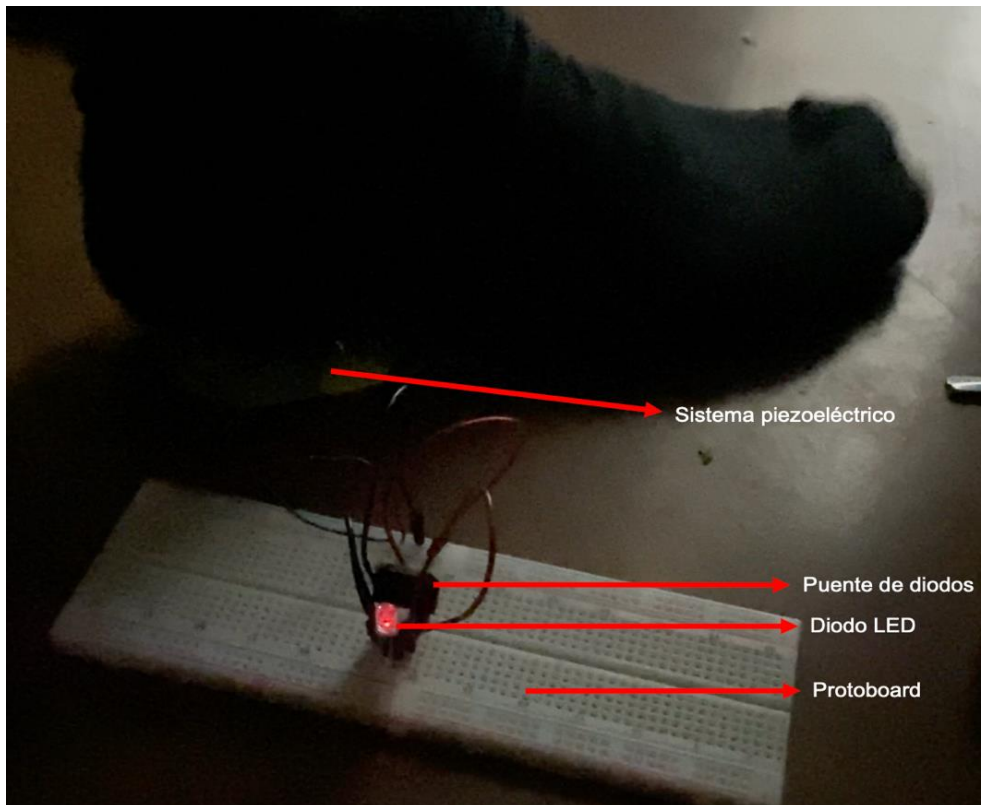


El sistema de once sensores piezoeléctricos en paralelo fue montado encima del segundo prototipo de plantilla y fue pisado simulando la forma de caminar. También, se optó por colocar cinta aislante sobre las soldaduras de las partes positivas y negativas para evitar así posibles roturas de las conexiones.

Se pisó el prototipo varias veces con mucho cuidado para no desconectar las conexiones entre los sensores piezoeléctricos. En la figura 4.8 de la siguiente página, se puede observar la ejecución de la prueba del encendido del diodo LED que se hizo a oscuras para poder distinguir el color rojo del diodo LED.

Figura 4.8

Prueba del encendido del diodo LED



A primera vista, si la persona se mantiene parada encima del sistema, este no genera energía para prender el diodo LED. En cambio, justo cuando la persona va a levantar el talón para dar el siguiente paso, el diodo LED se prende por unos segundos.

El diodo LED de color rojo presenta trabajo con una corriente de 20 mA y un voltaje de 1.8 V (Vishay Semiconductors, 2012). Con un multímetro digital, se midió el voltaje generado por el sistema de once piezoeléctricos que fue de 1 V aproximadamente.

4.2.1.3 Comparación de resultados de la investigación

En resumen, los resultados de las pruebas experimentales del proyecto se presentan en la tabla 4.1 de la siguiente página, la cual muestra los resultados medidos con dos instrumentos digitales que son el osciloscopio y el multímetro.

Tabla 4.1

Resumen de los resultados de las pruebas experimentales

Instrumento de medición	Voltaje obtenido
Osciloscopio digital	Máximo 5 V
Multímetro digital	Hasta 1 V

Ambos resultados presentan diferentes valores, esto se debe a la función de los equipos. Lo recomendable es utilizar un osciloscopio para mediciones cuantitativas y cualitativas.

Según Fluke Corporation (2020c), si bien un multímetro digital es una herramienta que se utiliza para realizar mediciones precisas de señales discretas de resolución en la tensión, en la corriente o en la frecuencia de una señal; no puede representar visualmente las formas de onda para revelar la intensidad de la señal, el formato de la onda ni el valor instantáneo de la señal.

En cambio, el osciloscopio muestra los valores numéricos de una onda instantáneamente. También revela la forma de la onda, incluidas su amplitud (tensión) y frecuencia.

4.2.1.4 Carga de una unidad de almacenamiento

Para poder cargar una batería, es necesario añadir una etapa adicional que filtre la señal y de ser necesario la amplifique. El sistema piezoeléctrico propuesto genera suficiente voltaje para poder encender un diodo LED como se hizo en la prueba anterior.

El arreglo bastante simple y económico de sensores piezoeléctricos y los componentes electrónicos no son suficientes para la carga de un condensador de baja capacidad, que requiere de 10 μ F y 16 V para la carga de este. Los autores Ahmad & Hashim (2011) detallan este inconveniente en su investigación, comentando que “la mayoría de los investigadores se están centrando en la aplicación de golpe de talón con piezoeléctrico. Pero aparentemente, la corriente eléctrica o los voltajes generados son muy bajos”.

Al no generarse suficiente energía, se optó por tomar como referencia los resultados de artículos científicos y tesis. Según la literatura revisada, los autores

presentaron diferentes propuestas de pruebas experimentales según la unidad a almacenar. Estas se muestran a continuación.

El prototipo de los autores **Ahmad & Hashim (2011)** ubicó un parche piezoeléctrico pegado a la altura de los dedos de una plantilla de zapatilla. El circuito cosechador de energía fue probado en una trotadora al caminar y correr a diferentes velocidades desde 2 a 8 km/h con un incremento de 0.5 km/h. La prueba se puede observar en la figura 4.9.

Figura 4.9

Prueba experimental en una trotadora

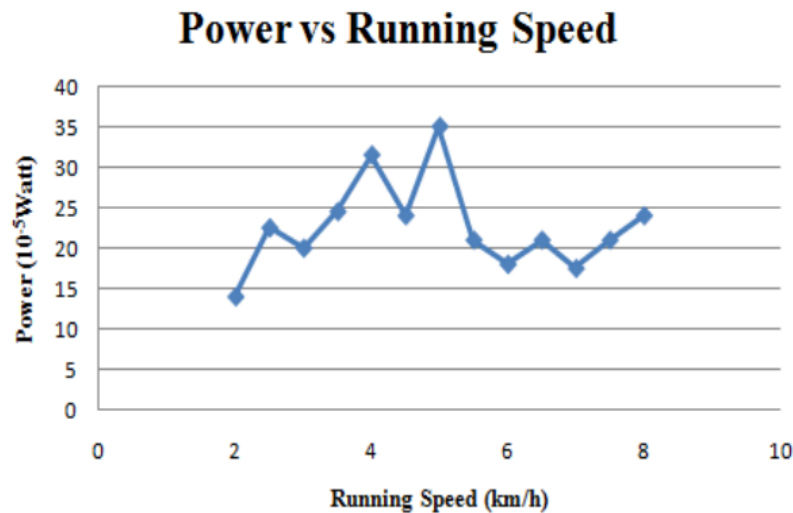


De “Development of energy harvesting device using piezoelectric material”, por R. Ahmad y M. H. Hashim, 2011 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/5775592>)

En la figura 4.10 de la siguiente página, se pueden observar los resultados de los ensayos con las velocidades que están dentro del rango de 2 a 5 km/h. Se demostró que la energía generada va aumentando al incrementar la velocidad, llegando a su máximo pico de generación de energía de 35×10^{-5} W.

Figura 4.10

Cantidad de energía generada por un parche piezoeléctrico al caminar y correr



De “Development of energy harvesting device using piezoelectric material”, por R. Ahmad y M. H. Hashim, 2011 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/5775592>)

Al pasar los 6 km/h hasta los 8 km/h, la cantidad de energía generada empieza a decrecer. Esto se debe a que la longitud del paso que se da al caminar a una velocidad de 2 a 5 km/h es relativamente más grande y el parche piezoeléctrico tiende a doblarse más, generando así mayor cantidad de potencia de salida, a comparación de la pisada que se da al correr que es más corta y de menor doblez del sensor piezoeléctrico. Los autores eligieron la velocidad óptima de 5 km/h para la carga de una batería de 40 mAh, del cual se cargó 1.2 V del voltaje de celda en 3 750 segundos.

Fernández Galeano (2018) hizo pruebas de medición de fuerza de dos tipos de sensores piezoeléctricos que son el piezofilm PVDF y el sensor de diafragma cerámico, con la intención de medir si la fuerza aplicada sobre los sensores piezoeléctricos es proporcional a la masa de las pesas de precisión. Cabe resaltar que el autor utilizó un amplificador de carga que convierte la carga en variaciones de voltaje proporcionales que dan la apariencia de ser señales de mayor magnitud haciendo que estas seas más fáciles de medir y manipular.

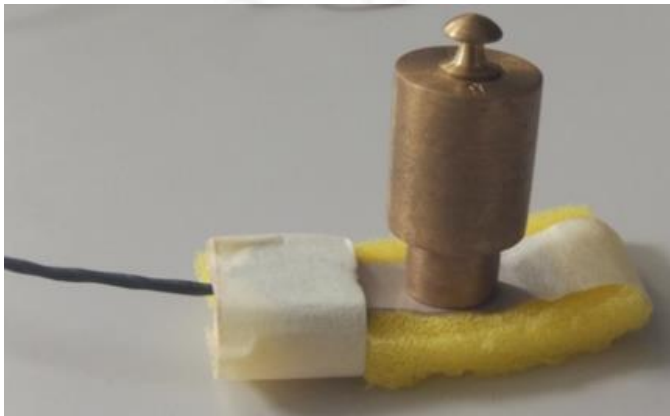
Se emplearon pesas de precisión de 20, 50 y 100 gramos que fueron colocadas en distintas posiciones encima de los sensores piezoeléctricos con sumo cuidado. Las pruebas consisten en variar el peso aplicado (en un rango de 10 a 100 gramos) y probar

la capacidad de un condensador de 100 nF con el propósito de ver cuáles son los efectos sobre los dos tipos de sensores.

Las primeras mediciones de fuerza se hicieron con un piezofilm. Se midió con un osciloscopio la poca cantidad de energía generada que fue hasta 500 mV cuando se utiliza un condensador de 100 nF y un peso de 100 gramos. Los detalles se observan en la figura 4.11 y la tabla 4.2.

Figura 4.11

Medición de fuerza con pesas de precisión encima del piezofilm



De “Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza”, por A. Fernández, 2018 ([https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández - Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández_-_Estudio_de_sensores_piezoeléctricos_en_aplicaciones_de_medición_de_fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y))

Tabla 4.2

Voltaje de salida de la prueba de medición de fuerza del piezofilm con condensador de 100 nF

Masa (gramos)	Voltaje de salida aprox. (mV)
20	90
50	250
100	500

Nota. De “Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza”, por A. Fernández, 2018 ([https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández - Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández_-_Estudio_de_sensores_piezoeléctricos_en_aplicaciones_de_medición_de_fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y))

Al probar con pesos superiores a 100 gramos, fue más difícil ejercer una fuerza homogénea encima del piezofilm y que este se deforme de misma manera, generando así una saturación en los valores del voltaje de salida. Este resultado fue consecuencia del

diseño del piezofilm que es ideal para aplicaciones que principalmente tienen a la vibración como fuente de entrada, en las que el sensor puede ser utilizado como voladizo. Las segundas mediciones de fuerza fueron con el piezocerámico de diafragma que soportó diferentes pesos de 20, 100, 200 y 500 gramos. En la figura 4.12, se puede observar la configuración de la prueba que requiere de un pedazo de plástico que aplaste justo el diafragma del piezocerámico.

Figura 4.12

Medición de fuerza con pesas de precisión encima del piezocerámico de diafragma



De “Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza”, por A. Fernández, 2018 ([https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández - Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández_-_Estudio_de_sensores_piezoeléctricos_en_aplicaciones_de_medición_de_fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y))

En la tabla 4.3 de la siguiente página, se presentan los resultados bastante favorables de la prueba. Se puede apreciar que, al aumentar la masa de las pesas de precisión, la cantidad de energía también va aumentando. La última prueba de la presión del piezocerámico con 500 gramos de masa, se logró generar 1 400 mV de energía.

Tabla 4.3

Voltaje de salida de la prueba de medición de fuerza del piezocerámico de diafragma con un condensador de 100 nF

Masa (gramos)	Voltaje de salida aprox. (mV)
20	130
100	300
200	520
500	1 400

Nota. De “Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza”, por A. Fernández, 2018 (https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández_-_Estudio_de_sensores_piezoeléctricos_en_aplicaciones_de_medición_de_fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Es importante mencionar que a comparación del piezofilm, que funciona mejor en aplicaciones en las que el sensor se tenga que doblar, el sensor de diafragma cerámico es capaz de medir fuerzas más grandes.

Sepúlveda Orozco (2014) hizo dos pruebas importantes con el nuevo diseño mejorado del sensor tipo PZT Cymbal. La primera prueba fue la simulación de una caminata por 1 hora y 40 minutos en una trotadora a 5.6 km/h, que se puede observar en la figura 4.13.

Figura 4.13

Simulación de caminata de 5.6 km por hora en una caminadora

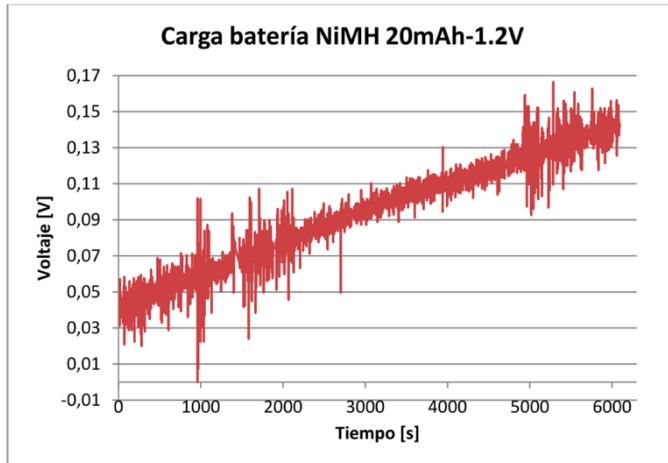


De “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (Energy Harvesting) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar”, por E. Sepúlveda, 2014 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>)

Como se puede ver en la figura 4.14, la batería de NiMH³ 20 mAh y a 1.2 V inicia con una carga de 36 mV. A medida que pasa el tiempo, la cantidad de voltaje va aumentando hasta llegar a aproximadamente 144 mV.

Figura 4.14

Simulación de una caminata a 5.6 km/h para la carga de una batería de NiMH 20 mAh a 1.2 V



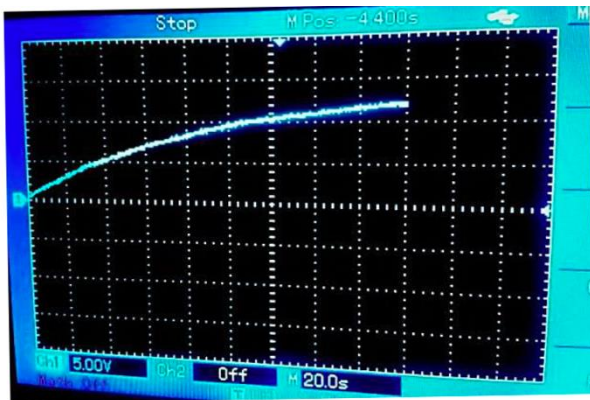
De “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (*Energy Harvesting*) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar”, por E. Sepúlveda, 2014 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>)

En la segunda prueba, se trotó a la misma velocidad que la prueba anterior para la carga de un condensador de 470 μ F. Se alcanzó un voltaje 12.5 V, mientras que este valor se redujo a 2.8 V en presencia de una resistencia de 100 K Ω . Los resultados se observan en las figuras 4.14 y 4.15 de la siguiente página.

³ Níquel-Hidruro Metálico

Figura 4.15

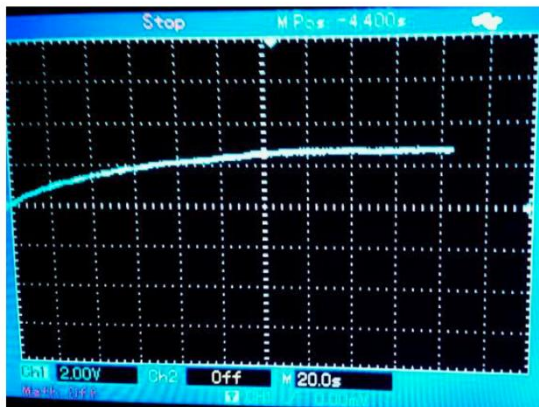
Generación de 12.5 V sin el uso de una resistencia al caminar a una velocidad de 5.6 km/h en una trotadora



De “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (Energy Harvesting) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar”, por E. Sepúlveda, 2014 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>)

Figura 4.16

Generación de 2.8 V con el uso de una resistencia de 100 K Ω al caminar a una velocidad de 5.6 km/h en una trotadora



De “Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (Energy Harvesting) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar”, por E. Sepúlveda, 2014 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>)

Si consideramos el dato de una potencia generada de 78.4 μ W, una resistencia de 100 K Ω y 2.8 V de voltaje, se puede hallar la cantidad de corriente del circuito que es de 28 μ A. Con estos datos se calculó que tomaría 714.3 horas (29.8 días) en cargar una batería de NiMH de 20 mAh a 1.2 V.

Por otro lado, este resultado bastante favorable de un total de $78.4 \mu\text{W}$ de potencia generada tomando en cuenta el uso de la resistencia de $100 \text{ K}\Omega$ puede servir para cargar sistemas de alimentación de baja potencia como microcontroladores, transmisores, etc.

Palomino Vera (2016) colocó cuidadosamente los sensores piezoeléctricos tipo tweeter de tal forma que los sensores queden suspendidos por encima de la rueda de la bicicleta elíptica, con la finalidad de que, al momento de pedalear, la rueda golpee los ocho sensores piezoeléctricos suspendidos. Se simuló una rutina diaria de ejercicios de un rango de 100 a 180 rpm.

El autor conectó los transductores piezoeléctricos a cuadriplicadores de voltaje compuestos por diodos Schottky y capacitores. Utilizó un módulo para el acondicionamiento de la señal recibida y limitar el paso de la corriente cuando la batería esté cargada. Por último, se conectó un regulador de tensión para mantener el voltaje constante en 5 V.

En la figura 4.17 de la siguiente página, se puede observar el detalle de la configuración del prototipo cosechador de energía mecánica, que se probó con dos propósitos. El primero de encender de tres bombillas LED de 5 W cada una, y el segundo de almacenar la energía mecánica convertida en energía eléctrica para la carga de una batería de 6 V a 4 000 mAh, logrando así mantener encendidas las bombillas cuando no se pedalee y no se pierda la energía residual.

Figura 4.17

Simulación de rutina de ejercicio en una bicicleta elíptica



De “Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte”, por K. Palomino, 2016 (<http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/237>)

Se necesitan 30 minutos para genera suficiente voltaje de 5.83 V para mantener encendidas las tres bombillas LED por 48 minutos. Por otro lado, se necesitaron 8 horas y 10 minutos, y un voltaje entre 5.69 y 6.95 V para cargar la batería de 6 V a 4 000 mAh, la cual mantiene encendidas las bombillas LED por aproximadamente 9 horas y 40 minutos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto de investigación cierra con este capítulo. Se especifican las conclusiones y recomendaciones de la elaboración del sistema de captación de energía.

5.1 Conclusiones

- La elaboración de un sistema de captación de la energía que se da al caminar es técnicamente viable mediante el uso del fenómeno de la piezoelectricidad para la captura de la energía que se pierde al caminar.
- La piezoelectricidad se puede utilizar como fuente de energía no convencional para la generación de energía limpia a partir de la presión que se ejerza al caminar. Sin embargo, esta tecnología, por si sola, genera poca cantidad de voltaje.
- En la **etapa de sistema de captación de energía**, se utilizaron los sensores piezoeléctricos PZT tipo tweeter. Estos están diseñados para generar sonido mas no están hechos para generación de energía.
- Se escogió este tipo de sensor de diafragma cerámico porque es ideal para aplicaciones de presión. Además, se cuenta con una buena disponibilidad en el mercado y su precio es muy económico.
- Al pisar el sistema de once sensores piezoeléctricos, se genera energía que no está lista para ser usada por su carácter de corriente alterna. Por esta razón, en la **etapa de acondicionamiento**, se pueden utilizar diversos componentes electrónicos para rectificar y amplificar la corriente alterna generada. En cuanto a componentes electrónicos simples, se puede emplear un puente de diodos, cuyo fin es el de corregir los valores negativos y positivos a solo positivos. Luego, se puede utilizar un condensador que está encargado de conservar un voltaje estable que no dañe la unidad de almacenamiento posterior con las variaciones de tensión.
- En la **etapa de almacenamiento**, la unidad a cargar puede variar según la fuente de entrega de energía, la aplicación y capacidad que se requieran. Se pueden utilizar condensadores, supercondensadores y baterías.
- Se escogió el calzado deportivo como **aplicación**, ya que la principal actividad que hace el ser humano es caminar. El tipo de calzado que normalmente se utiliza

es el deportivo, este tipo de calzado requiere de plantillas hechas de materiales ligeros y suaves al momento de pisarlas, en los que se puede poner el sistema piezoeléctrico.

- Se utilizó un diseño con aplicación médica de la plataforma Thingiverse de MakerBot para la impresión del **primer prototipo**. No se pudo conocer las especificaciones de la plantilla y tampoco se pudieron modificar. El resultado de la impresión 3D de la parte del talón del diseño fue bastante malo en cuanto al acabado y la flexibilidad del prototipo.
- El **segundo prototipo** fue elaborado con el concepto de ingeniería inversa, la cual permitió que se trabaje con medidas reales de un pie de una persona talla 37.5.
- La **ingeniería inversa** permite reproducir un objeto real en un computador para modificar la información tridimensional con el fin de hacer mejoras. Se empleó la técnica de ingeniería inversa de digitalización del **escaneo 3D**. Con ayuda del HandySCAN 3D y el software VXscan para recopilar la información dimensional y geométrica del pie de una persona talla 37.5 con el propósito de recrear un modelo tridimensional y elaborar una plantilla de calzado deportivo.
- El resultado del **segundo prototipo** no fue como se esperaba. La estructura rígida obtenida no presenta la característica de maleabilidad que tienen las plantillas comunes. Además, no permitía la ubicación de los sensores piezoeléctricos en los espacios circulares que se diseñaron.
- Para la elaboración del **tercer prototipo**, se redujó el porcentaje del parámetro de impresión Infill Density con el fin de obtener una estructura interna más flexible. A pesar de haberse probado con la modificación del parámetro, se obtuvo una estructura rígida.
- Por otro lado, el uso del filamento flexible PLA no es ideal para la impresión de prototipos plantillas que por naturaleza son maleables y cómodas de pisar. Se desconocía información importante sobre el filamento. Este requiere de un máximo de 0.3 mm de espesor para poder ser flexible. La base extruida que se utilizó como molde tiene entre 3 a 5 mm de espesor.
- El **cuarto prototipo** compuesto por el segundo prototipo y el sistema piezoeléctrico que incluye los sensores piezoeléctricos y un puente de diodos, se

puso a prueba al presionar los sensores para medir cuánto voltaje se genera y para ver el comportamiento de la señal eléctrica.

- La señal eléctrica se midió con un osciloscopio digital. El resultado presenta valores de voltaje mínimo y máximo de aproximadamente -2.5 y 5 V, respectivamente. Este es el comportamiento general de la corriente alterna generada en aplicaciones de impacto.
- La segunda prueba fue encender un diodo LED de color rojo para comprobar que el circuito propuesto funciona. Se pisó el cuarto prototipo y se logró encender el diodo, generando aproximadamente hasta 1 V con cada pisada. Se utilizó un multímetro digital para la medición.
- Se observó el diodo LED prende justo cuando la persona va a levantar el pie para dar el siguiente paso. Mientras que cuando la persona se mantiene parada sobre el sistema, el diodo LED no se enciende.
- Entre los equipos de medición mencionados, se escogió el resultado del osciloscopio digital. Este brinda información más detallada sobre las características de la onda generada, como la forma de la onda, las variaciones de voltaje, etc.
- El voltaje pico de 5 V es el voltaje máximo generado por el sistema piezoeléctrico al ser presionado, ya que las conexiones que se hicieron fueron en paralelo y según esta configuración, el voltaje se mantiene constante a lo largo del sistema.
- Por limitaciones de la pandemia COVID-19, no se pudieron hacer más pruebas experimentales en el laboratorio de ingeniería eléctrica.
- No se genera suficiente energía para cargar una unidad de almacenamiento como se esperaba. Un condensador requiere de 10 μ F y 6 V, mientras que la batería de un celular generalmente necesita aproximadamente 3 000 mAh a 5 V.

5.2 Recomendaciones

- Como parte de la etapa de la elección del sistema de captación de energía, se puede usar como ventaja la combinación y la complementación de las diversas fuentes de captación de energía a niveles micro y macro para generar una mayor cantidad de energía limpia.

- La piezoelectricidad se podría utilizar en aplicaciones en las que el sistema cosechador de energía esté en contacto con fuentes de alta vibración constante o de movimiento como por ejemplo la rueda de una bicicleta elíptica para que así se genere una mayor cantidad de energía.
- Revisar las hojas de especificaciones de los sensores piezoeléctricos antes de trabajar con ellos, al igual que de las componentes electrónicos.
- Antes de empezar con la investigación, se desconocían los materiales y sustancias químicas que se utilizaron para la fabricación de los sensores piezoeléctricos PZT. Este tipo de sensor contiene plomo que es una sustancia dañina tanto para el medio ambiente como para las personas involucradas en su fabricación. Actualmente se está utilizando el titanato de bario como alternativa al titanato zirconato de plomo (PZT).
- La utilización de sensores piezoeléctricos industriales es una opción muy cara. Un solo sensor marca Kistler cuesta \$2 603.2 sin considerar los gastos de importación. Por esta razón, se recomienda que la recolección de energía al caminar se base en el concepto de la piezoelectricidad mas no que se utilicen los sensores piezoeléctricos.
- Si con el sistema de captación se genera poca energía, se podría usar un multiplicador de voltaje como un convertidor DC-DC que ayuda a elevar la tensión de entrada y mantenerla continua en la salida. Otra opción interesante es un cuádruplicador de voltaje que tiene la finalidad de aumentar la cantidad de voltaje generado.
- En cuanto al filamento que se podría utilizar para el prototipado rápido con impresión 3D, se podría utilizar el TPU (Poliuretano Termoplástico) como una alternativa de buen rendimiento y con propiedades flexibles, lo cual lo hace ideal para elaboración de plantillas y calzado.
- Todas las pruebas experimentales de laboratorio deben realizarse varias veces para tener resultados más confiables.

REFERENCIAS

- 3DCADPortal. (2019). *Control numérico*. <http://www.3dcadportal.com/control-numerico.html>
- 3DCADPortal. (2020). *Software para diseño de calzado*. <http://www.3dcadportal.com/3d-software/reverse-engineering/>
- 3Ders. (2019). *3D printing basics*. <https://www.3ders.org/3d-printing-basics.html#materials>
- 3DNatives. (2017). *SLA: Impresión 3D por estereolitografía*. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- 3DNatives. (2019). *Guía completa: plásticos en la impresión 3D*. <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>
- Adidas. (2017). *Guía de tallas*. <https://www.adidas.pe/guia-de-tallas.html>
- Agudelo Mendoza, A. I., Briñez Santamaria, T. J., Guarín Urrego, V., Ruiz Restrepo, J. P., & Zapata García, M. C. (2013). Marcha: descripción, métodos, herramientas de evaluación y parámetros de normalidad reportados en la literatura. *CES Movimiento y Salud*, 1(1), 29–43.
- Ahmad, R., & Hashim, M. H. (2011). Development of energy harvesting device using piezoelectric material. *2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2011.5775592>
- Artec Europe. (2019). *Geomagic Freeform*. <https://www.artec3d.com/es/3d-software/geomagic-freeform>
- Autodesk Inc. (2019a). *¿Qué es el modelado 3D?* <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-modeling-software>
- Autodesk Inc. (2019b). *¿Qué es la impresión 3D?* <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>

- B & H Foto & Electronics Corp. (2019). *NinjaTek Ninjaflex 3mm TPU Flexible Filament*.
https://www.bhphotovideo.com/c/product/1275254-REG/ninatek_3d3051290_ninjaflex_flexible_tpu_filament.html
- Barreto Andrade, J., Villarroja-Aparicio, A., & Calero Morales, S. (2017). Biomecánica de la marcha atlética. Análisis cinemático de su desarrollo y comparación con la marcha normal. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 36(2), 53–69.
<http://www.revibiomedica.sld.cu/index.php/ibi/article/view/14>
- Beamler. (2020). *¿Cuál es la diferencia entre el TPE y el TPU en impresión 3D?*
<https://www.beamler.com/es/cual-es-la-diferencia-entre-el-tpe-y-el-tpu-en-impresion-3d/>
- Betancur Rodríguez, M. (2011). *Ingeniería Inversa Aplicada: metodología y aplicaciones industriales*. [Universidad Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico].
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/9080/Mario_BetancurRodriguez_2011.pdf?sequence=2
- Capcha, M. (2017). *Energía geotérmica: Clave en la lucha frente al cambio climático*. Sociedad Peruana de Derecho Ambiental.
<https://www.actualidadambiental.pe/?p=46745>
- Casanova Gómez, M. (2013). *Sistemas de cosecha de energía para sistemas electrónicos autónomos* [Universidad Rey Juan Carlos].
https://eficiencia.urjc.es/bitstream/handle/10115/12062/TFG_SISTEMAS_DE_COSECHA_DE_ENERGIA_PARA_SISTEMAS_ELECTRONICOS_AUTONOMOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- COES. (2021). *Evolución y Participación por Tipo de recurso*.
<https://www.coes.org.pe/Portal/portalinformacion/VisorPowerBI>
- Components 101. (2020). *Piezoelectric Sensor*.
<https://components101.com/sensors/piezoelectric-sensor>
- Creaform. (2019a). *Escáneres 3D portátiles profesionales*.
<https://www.creaform3d.com/es/soluciones-de-metrologia/escaneres-3d-portatiles>
- Creaform. (2019b). *VXmodel: Módulo de software escaneado a CAD*.

<https://www.creaform3d.com/es/soluciones-de-metrologia/vxmodel-modulo-de-software-escaneado-cad>

- Creaform. (2020). *VXelements*.
https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/brochures/files/vxelement_brochure_sp_22052019.pdf
- Cruz Ocampo, R. J. (2012). *Integración de técnicas de ingeniería inversa en el desarrollo de interfaces de usuario dirigido por modelos* [Universidad Castilla-La Mancha].
<https://pdfs.semanticscholar.org/def5/7d1f16f271995bfb5fdc085165b76d5a3677.pdf>
- Cuesta, E., Rico, C., Fernández, P., & Álvarez, B. J. (2014). Aplicaciones metrológicas de los láseres por triangulación (DM-284 2005) original. *Research Gate*, 27.
https://www.researchgate.net/publication/260284566_Aplicaciones_Metrologicas_de_los_laseres_por_triangulacion_DM-284_2005_original
- Dassault Systemes SolidWorks Corporation. (2019). *CAD en 3D de SolidWorks*.
<https://www.solidworks.com/es/category/3d-cad>
- Decreto Legilastivo N°1002. (2008). *DECRETO LEGISLATIVO DE PROMOCIÓN DE LA INVERSIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES*.
[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con5_uibd.nsf/99ACBE30C841C1C50525823C00772D7C/\\$FILE/DL_1002.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con5_uibd.nsf/99ACBE30C841C1C50525823C00772D7C/$FILE/DL_1002.pdf)
- Dewangan, S., & Dubey, A. (2017). Design and implementation of energy harvesting system using piezoelectric sensors. *International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, ICICCS 2017*, 598–601.
<https://doi.org/10.1109/ICCONS.2017.8250532>
- Dung, C. V., & Sasaki, E. (2016). Numerical simulation of output response of PVDF sensor attached on a cantilever beam subjected to impact loading. *Sensors*, 16(5).
<https://doi.org/10.3390/s16050601>
- Enel. (2018). *Wayra I: la energía del viento impulsando una nueva era*. Enel Perú.
<https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/wayra-i-la-primera-central-eolica-de-enel-en-peru.html>

- Face, B. R. (2006). Footwear incorporating piezoelectric energy harvesting system. *United States Patent Application Publication*. <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/6b/c8/a54846579f47e5/US20060021261A1.pdf>
- Fan, K., Liu, Z., Liu, H., Wang, L., Zhu, Y., & Yu, B. (2017). Scavenging energy from human walking through a shoe-mounted piezoelectric harvester. *Applied Physics Letters*, 110(14). <https://doi.org/10.1063/1.4979832>
- Fernández Galeano, A. E. (2018). *Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza* [Universidad Politécnica de Valencia]. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández - Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111211/Fernández%20-%20Estudio%20de%20sensores%20piezoeléctricos%20en%20aplicaciones%20de%20medición%20de%20fuerza.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Filament2Print. (n.d.). *ASA Natural*. <https://filament2print.com/es/asa/679-asa-natural.html>
- Fluke Corporation. (2020a). *¿Qué es la corriente?* <https://www.fluke.com/es-pe/informacion/mejores-practicas/aspectos-basicos-de-las-mediciones/electricidad/que-es-la-corriente>
- Fluke Corporation. (2020b). *¿Qué es la tensión?* <https://www.fluke.com/es-pe/informacion/mejores-practicas/aspectos-basicos-de-las-mediciones/electricidad/que-es-la-tension>
- Fluke Corporation. (2020c). *Comparación entre un multímetro y un osciloscopio*. <https://www.fluke.com/es-ve/informacion/blog/osciloscopios/comparacion-entre-un-multimetro-y-un-osciloscopio>
- Fluke Corporation. (2021). *¿Qué es la capacitancia?* <https://www.fluke.com/es-pe/informacion/mejores-practicas/aspectos-basicos-de-las-mediciones/electricidad/que-es-la-capacitancia>
- formaCAD Engineering & Consulting S.L. (2019). *Ingeniería Inversa: ¿Qué es?* <https://www.formacad.es/cad/ingenieria-inversa/>
- González, A. F., Cesari, R. M., & Vicioli, R. O. (2009). *Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico*. [Universidad Tecnológica Nacional].

<http://www1.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/piezoelectricidad.pdf>

Hegde, N., Bries, M., & Sazonov, E. (2016). A comparative review of footwear-based wearable systems. *Electronics*, 5(3), 48. <https://doi.org/10.3390/electronics5030048>

Ibañez Garcia, J. (2012). Diseño de un prototipo para generación energética mediante tecnología piezoeléctrica. Aplicación a escaleras. *Universidad Politécnica de Cataluña*, 33. <http://innovadays.epsevg.upc.edu/wp-content/uploads/2014/ponencias/Javier-Ibanez.pdf>

JG Cistem SA. (2019). *Tipos de escaneo 3D: conoce la ciencia detrás de la digitalización tridimensional*. <https://tresde.pe/tipos-de-escaneo-3d-conoce-la-ciencia-detras-de-la-digitalizacion-tridimensional/>

Jiménez Martínez, F. J., de Frutos, J., Alonso, D., & Vázquez, M. (2015). Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54(6), 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.09.001>

JMG Soluciones S.A.S. (2018). *¿Qué es la impresión 3D?* <https://www.jmgsoluciones.com/blog/que-es-la-impresion-3d>

John Livingston, J., & Hemalatha, M. (2014). Charging an electronic gadget using piezoelectricity. *Indian Journal of Science and Technology*, 7(7), 945–948. https://www.academia.edu/8523639/Charging_an_Electronic_Gadget_using_Piezo_electricity

KPS. (2020). *Manual de funcionamiento: multímetro digital MT-30*. <http://kps-soluciones.es/wp-content/uploads/2017/08/Manual-KPS-MT30.pdf>

Kumar, C. N. (2015). Energy collection via Piezoelectricity. *Journal of Physics: Conference Series*, 662(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/662/1/012031>

LS3D. (2020). *Makerbot Replicator 2X*. <https://lv-3d.fr/es/produit/makerbot-replicator-2x>

Maiwa, H. (2016). Piezoelectric Energy Harvesting. *InTech*, 15. <https://doi.org/10.5772/64162>

MakerBot Industries. (2019). *Custom settings*.

- https://support.makerbot.com/learn/makerbot-desktop-software/print-settings/custom-settings_11912#infill
- MakerBot Industries. (2020). *The all-new MakerBot print*.
<https://www.makerbot.com/3d-printers/apps/makerbot-print/>
- Mateu, L., & Moll, F. (2006). Appropriate charge control of the storage capacitor in a piezoelectric energy harvesting device for discontinuous load operation. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 132(1 SPEC. ISS.), 302–310.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.06.061>
- Mayo Foundation for Medical Education and Research. (2020). *Calzado deportivo: las características y el calce adecuados para mantenerte en movimiento*.
<https://www.mayoclinic.org/es-es/healthy-lifestyle/fitness/in-depth/walking/art-20043897>
- Mezei, F. (2011). Basics Concepts. In *Neutrons in Soft Matter*.
<https://doi.org/10.1002/9780470933886.ch1>
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Huella Ecológica en el Perú*.
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/huella-ecologica-peru>
- Mohammadi, M. M. (2013). A comparison between quartz and PZT ceramic for sensoric applications. *Smart Materials and Structures*.
<http://firepubs.com/article/comparison-between-quartz-and-pzt-ceramic-sensoric-applications>
- Murata Manufacturing Co. (2020). *Piezoelectric sound components*.
<https://www.murata.com/~//media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p37e.ashx>
- Naylamp Mechatronics. (n.d.). *Led difuso 5mm*. <https://naylampmechatronics.com/luces-iluminacion/91-led-difuso-5mm.html>
- Osinergmin. (n.d.). *Producción de energía por tipo de combustible, SEIN 2020*.
<https://observatorio.osinergmin.gob.pe/produccion-tipo-combustible>
- Osinergmin. (2008). *Energías No Convencionales en el Perú Situación Actual y Perspectivas*.
<https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/electricidad/Paginas/IVCongresoGFE/ar>

chivos/1_Exposiciones/35_PERU_GuillermoEcheandia.pdf

Osinergmin. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*.
http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energia-Renovable-Peru-10anios.pdf

Osinergmin. (2018). *Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación*. Organismo Supervisor de La Inversión En Energía y Minería.
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/Publicaciones/Compendio-Proyectos-GTE-Operacion-marzo-2018.pdf

Palomino Vera, K. A. (2016). *Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte* [Universidad Tecnológica del Perú]. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/237>

Perales Alcacio, J. L. A. (2010). *Desarrollo y evaluación biomecánica de plantillas de poliuretano usadas en calzado de seguridad* [Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas].
https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1019/64/1/TESIS_AdianPerales.pdf

Perú 21. (2016). *Parques eólicos en Perú aportan 239 MW al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional*. Diario Perú 21. <https://peru21.pe/economia/parques-eolicos-peru-aportan-239-mw-sistema-electrico-interconectado-nacional-214608>

Proto Labs. (n.d.). *Sinterizado selectivo por láser*. <https://www.izaro.com/sinterizado-selectivo-por-laser/c-1518087228/>

Pucp. (n.d.). *Escaneo 3D*. Pontificia Universidad Católica Del Perú.
<https://www.pucp.edu.pe/veo/manufactura-digital-3d/escaneo-3d/>

Queccara Castilla, E. J. (2014). *Elaboración de un sistema de cosecha de energía utilizando un transductor electromagnético* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6025>

Ramos Acosta, D. A. (2013). Uso de la ingeniería inversa como metodología de enseñanza en la formación para la innovación. *World Engineering Education*

Forum, 1–7.

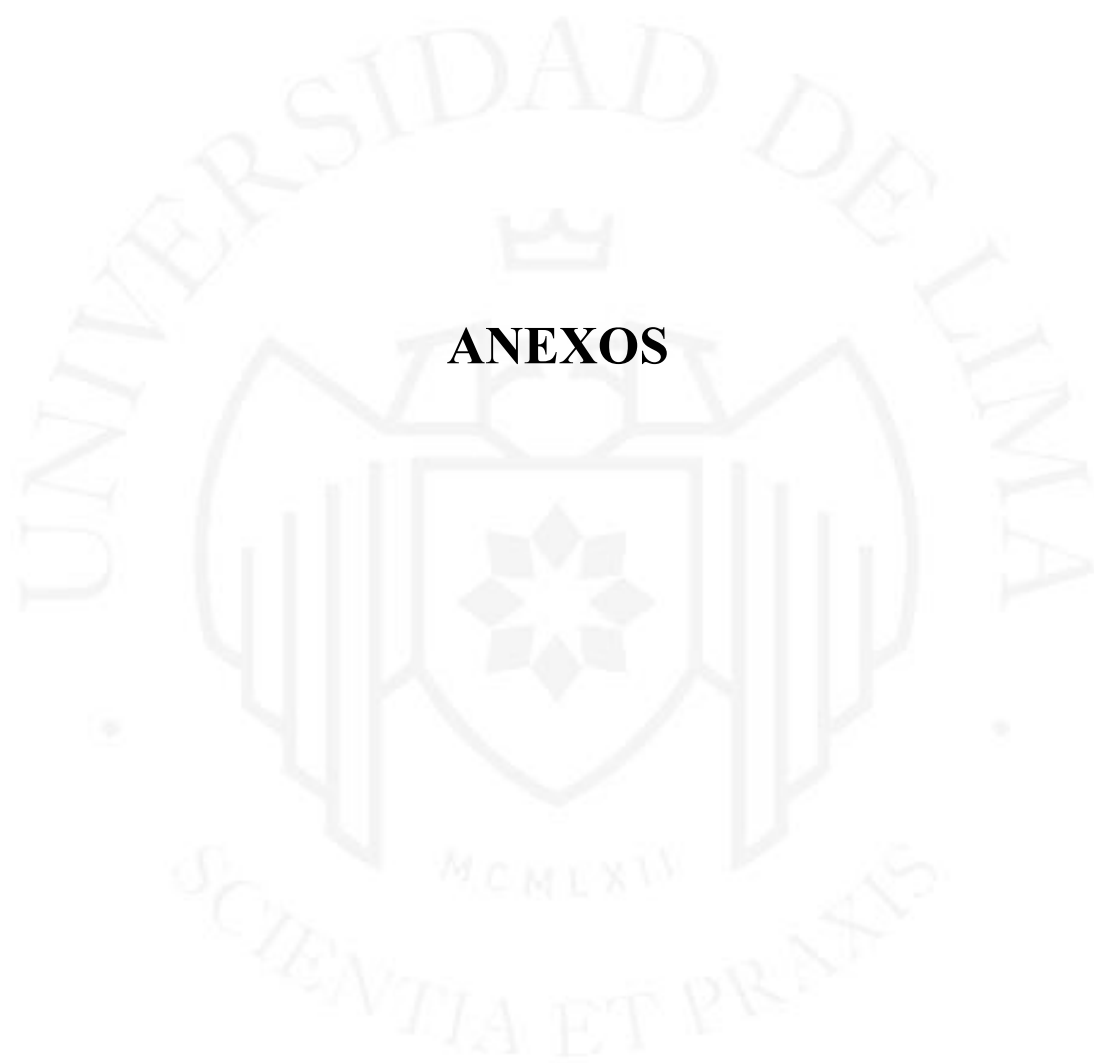
- Robert McNeel & Associates. (2019). *Características de Rhino 6*.
<https://www.rhino3d.com/6/features>
- Sepúlveda Orozco, E. (2014). *Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (Energy Harvesting) mediante Optimización Topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar* [Universidad Nacional de Colombia]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/>
- Siemens Industry Software Inc. (2019a). *Diseño asistido por ordenador (CAD)*.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>
- Siemens Industry Software Inc. (2019b). *Fabricación asistida por ordenador (CAM)*.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-manufacturing-cam/13139>
- Siemens Industry Software Inc. (2019c). *Ingeniería asistida por ordenador (CAE)*.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>
- Tarifas de Luz. (n.d.). *¿Qué es la potencia eléctrica?*
<https://www.tarifasdeluz.com/faqs/potencia-electrica/>
- Tektronix. (2008). *TDS2000C and TDS1000C-EDU Series Digital Storage Oscilloscopes (User Manual)*. http://148.204.232.249/osciloscopio_manuales/TBS1000B-and-TBS1000B-EDU-Oscilloscope-User-Manual-ES-ES.pdf
- Twenergy. (2019). *¿Qué son los supercondensadores y cuáles son sus aplicaciones?*
<https://twenergy.com/eficiencia-energetica/almacenamiento-de-energia/supercondensadores-que-son-aplicaciones/>
- Vishay Semiconductors. (2012). *High Intensity LED, Ø 5 mm Clear Package*.
<https://www.compic.es/led-s-5mm/13-led-rojo-5mm-alta-luminosidad.html>
- Xie, L., & Cai, M. (2015). An in-shoe harvester with motion magnification for scavenging energy from human foot strike. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2428618>
- Yamuna, M. B., & Sundar, K. S. (2014). Design of piezoelectric energy harvesting and

storage devices. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(8), 0953.
<https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0308007>



BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, R., & Hashim, M. H. (2011). Development of energy harvesting device using piezoelectric material. *2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2011.5775592>
- Casanova Gómez, M. (2013). *Sistemas de cosecha de energía para sistemas electrónicos autónomos* [Universidad Rey Juan Carlos]. [https://ciencia.urjc.es/bitstream/handle/10115/12062/TFG. SITEMAS DE COSECHA DE ENERGÍA PARA SISTEMAS ELECTRÓNICOS AUTÓNOMOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ciencia.urjc.es/bitstream/handle/10115/12062/TFG.SITEMAS%20DE%20COSECHA%20DE%20ENERGÍA%20PARA%20SISTEMAS%20ELECTRÓNICOS%20AUTÓNOMOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Palomino Vera, K. A. (2016). *Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte* [Universidad Tecnológica del Perú]. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/237>




ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones de la impresora 3D MakerBot Replicator 2x

Impresora 3D		
	Marca	MakerBot
	Dimensiones	490 x 420 x 531 mm
	Peso	12.6 Kg
	Potencia	100 W
	Frecuencia	50/60 Hz


Nota. Adaptado de *MAKERBOT REPLICATOR 2X*, por LS3D, 2020 (<https://lv-3d.fr/es/produit/makerbot-replicator-2x>)

Anexo 2: Especificaciones del filamento flexible PLA

Filamento flexible PLA		
	Marca	MakerBot
	Tipo	Filamento flexible PLA
	Espesor	1.75 mm
	Peso	1 kg

Nota. Adaptado de *NinjaTek Ninjaflex 3mm TPU Flexible Filament*, por B & H Foto & Electronics Corp., 2019 (https://www.bhphotovideo.com/c/product/1275254-REG/ninjabot_3d3051290_ninjaflex_flexible_tpu_filament.html)

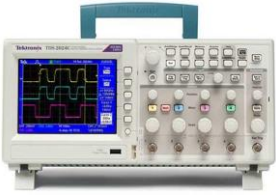
Anexo 3: Especificaciones del escáner 3D HandySCAN 700

HandyScan 700		
	Marca	Creaform
	Tipo de escáner	Profesional
	Dimensiones	122 x 77 x 294 mm
	Peso	0.85 kg
	Software	VXElement

Nota. Adaptado de *3D Scanner: HandySCAN 700*, por 3Dnatives, 2019 (<https://www.3dnatives.com/es/3D-compare/scanner/handyscan-700>)

Anexo 4: Especificaciones del osciloscopio digital


Osciloscopio digital

	Marca	Tektronix
	Modelo	TDS2002B
	Ancho de banda	60 MHz
	Velocidad de muestreo	Hasta 2 GS/s
	Otros	2 canales de medición

Nota. Adaptado de *TDS2000C and TDS1000C-EDU Series Digital Storage Oscilloscopes (User Manual)*, por Tektronix, 2011 (<http://148.204.232.249/osciloscopio%20manuales/TBS1000B-and-TBS1000B-EDU-Oscilloscope-User-Manual-ES-ES.pdf>)

Anexo 5: Especificaciones del multímetro digital

Multímetro digital

	Marca	KPS
	Modelo	MT30
	Lectura	Hasta 600 V
	Otros	Avisador acústico de continuidad y pruebas de diodos

Nota. Adaptado de *Manual de funcionamiento: multímetro digital MT-30*, por KPS, 2020 (<http://kps-soluciones.es/wp-content/uploads/2017/08/Manual-KPS-MT30.pdf>)