

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad De Ingeniería En Ciencias Aplicadas.

Carrera De Ingeniería En Mantenimiento Eléctrico.

**MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE NANOGENERADORES ELÉCTRICOS  
BASADO EN LOS EFECTOS TRIBO Y PIEZOELÉCTRICO.**

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

**AUTOR:**

Molina Chafuelan Milton Fernando

**DIRECTOR:**

PhD. Gerardo Collaguazo

Ibarra – Ecuador

2020 - 2021



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100404166-9		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Molina Chafuelan Milton Fernando		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Ibarra		
<b>EMAIL:</b>	mfmolinac@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	062 510 939	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0998884053

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE NANOGENERADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LOS EFECTOS TRIBO Y PIEZOELÉCTRICO
<b>AUTOR (ES):</b>	Molina Chafuelan Milton Fernando
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	26/05/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Gerardo Collaguazo PhD.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

#### 2. CONSTANCIA

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

Ibarra, a los 14 días del mes de junio de 2021

**EL AUTOR:**

Molina Chafuelan Milton Fernando



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Gerardo Collaguazo PhD.

### CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Molina Chafuelan Milton Fernando, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE NANOGENERADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LOS EFECTOS TRIBO Y PIEZOELÉCTRICO”** para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico.



Firmado electrónicamente por:  
**GERARDO  
ISAIAS  
COLLAGUAZO  
GALEANO**

-----  
Ing. Gerardo Collaguazo PhD.

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **Dedicatoria**

Todo el tiempo y esfuerzo invertido para poder desarrollar el presente trabajo está dedicado especialmente a mis queridos padres y hermanos porque ellos fueron y son el eje fundamental de mis metas alcanzadas, gracias por brindarme su apoyo incondicional cada día.

## **Agradecimiento**

Deseo expresar mi más sincero sentimiento de gratitud y respeto a todos quienes han hecho posible que tan anhelada meta sea por fin una realidad. De todo corazón un agradecimiento enorme a toda mi familia por brindarme su cariño y respaldo tanto económico como moral. Al MSc. Julio Guerra y al PhD. Gerardo Collaguazo por su calidad humana, comprensión y por tomar la dirección de esta tesis e ir guiándome hacia la culminación de la misma de una manera estricta y correcta.

A la Universidad Técnica del Norte por abrirme sus puertas y brindarme una educación de calidad y una formación académica derecha y muy reconocida. Además, cabe recalcar el esfuerzo de todos mis docentes por compartir e inculcar sus amplios conocimientos tanto dentro como fuera de la institución, por su amistad y entrega.

De una manera muy especial deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a todos mis compañeros y amigos por todos los momentos de alegrías y tristezas vividos en todo este tiempo.

*Molina Chafuelan Milton Fernando*

## Tabla de Contenido

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
CONSTANCIA	III
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR	IV
Dedicatoria	V
Agradecimiento	VI
Tabla de Contenido	VII
Índice de Figuras	X
Índice de Tablas	XII
Resumen	XIII
Abstract	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
A1. Contextualización	XV
A2. Planteamiento del problema	XVI
A3. Justificación del trabajo	XVI
A4. Alcance del trabajo	XVII
A5. Viabilidad del trabajo	XVIII
A6. Objetivo general	XVIII
A7. Objetivos Específicos	XVIII
CAPÍTULO 1	1
Revisión bibliográfica	1
1.1 Energy harvesting	1
1.2 Efecto triboeléctrico	2
1.3 Efecto piezoeléctrico	3
1.4 Nanogeneradores	6
1.4.1 Nanogeneradores Piezoeléctricos	7
1.4.2 Nanogeneradores Triboeléctricos	10
1.4.3 Materiales para nanogeneración eléctrica	13
1.4.4 Nanogeneradores híbridos	14
1.5 Análisis del efecto tribo y piezoeléctrico	16
1.6 Descripción de sustratos para generación	17
CAPÍTULO 2	19
Determinación del modelo matemático	19
2.1 Procedimiento para el modelado matemático de los nanogeneradores	19
2.2 Generación triboeléctrica	20
2.2.1 Densidad de carga superficial triboeléctrica	20

2.2.2	Voltaje en circuito abierto	21
2.3	Análisis de un nanogenerador triboeléctrico transparente ultra estirable	21
2.3.1	Separación de contacto por electrodo único	23
2.3.2	Resultados del nanogenerador triboeléctrico ultra estirable	24
2.4	Generación piezoeléctrica	24
2.4.1	Módulo de Young	25
2.4.2	Voltaje en función de la fuerza aplicada	25
2.4.3	Capacitancia del material piezoeléctrico	26
2.4.4	Densidad de carga	26
2.5	Diseño del prototipo de baldosa piezoeléctrica	26
2.5.1	SolidWorks	26
2.5.2	Proteus 8 Professional	27
2.5.3	Simulink	27
2.6	Desarrollo del prototipo piezoeléctrico	27
2.6.1	Selección de materiales para construcción del prototipo	29
2.6.2	Ensamblado de la baldosa	31
2.6.3	Diseño del circuito de almacenamiento de energía	33
2.6.4	Resultados de generación del prototipo de baldosa piezoeléctrica.	34
2.7	Modelado del generador piezoeléctrico	35
2.7.1	Resultados del generador piezoeléctrico	38
2.8	Modelado del nanogenerador piezoeléctrico	39
2.8.1	Generación vs nanogeneración piezoeléctrica	41
2.8.2	Resultados del nanogenerador piezoeléctrico	42
CAPÍTULO 3		43
Simulación y análisis de resultados		43
3.1	Software para el desarrollo de simulaciones	43
3.2	Programación del generador piezoeléctrico en LabVIEW	44
3.3	Programación del nanogenerador piezoeléctrico en LabVIEW	46
3.4	Análisis de resultados	47
3.4.1	Prototipo de baldosa piezoeléctrica	48
3.4.2	Nanogenerador piezoeléctrico	50
Conclusiones		51
Recomendaciones		52
Referencias		53
Anexos		56
Anexo A: Dimensionamiento del capacitor para el circuito de control de carga		56
Anexo B: Programación por diagrama de bloques		58





## Índice de Figuras

Fig. 1. Clasificación de la tecnología de recolección de energía según la fuente de energía.	1
Fig. 2. Modos para aprovechar el efecto triboeléctrico	2
Fig. 3: Monocristal	4
Fig. 4: Policristal	4
Fig. 5. (A) Efecto piezoelectrico directo, (B) Inverso	4
Fig. 6. Respuestas en función del tipo de excitación al piezoelectrico	5
Fig. 7. Desplazamiento de la corriente en los diferentes nanogeneradores	6
Fig. 8: Estructura Zigzag con un par de materiales piezoelectrico	8
Fig. 9: Capas en zigzag que mejoran la deformación por flexión y compresión.	8
Fig. 10: Funcionamiento de nanogeneradores triboelectricos	11
Fig. 11. (A) Esquema estructural Nanogenerador Triboelectrico. (B) Vista transversal.	12
Fig. 12: Diseño un nanogenerador híbrido “r -shaped”	15
Fig. 13: Híbrido usando efectos piezoelectricos y triboelectricos.	15
Fig. 14: Híbrido película de fluoruro de polivinilideno y electrodos Politetrafluoroetileno.	15
Fig. 15: Aprovechamiento de los nanogeneradores piezo y triboelectricos	16
Fig. 16. Procedimiento para el modelado de nanogeneradores Tribo y Piezoelectricos	19
Fig. 17. Estructura nanogenerador triboelectrico transparente ultra estirable	21
Fig. 18. Esquema de funcionamiento del Nanogenerador ultra estirable.	23
Fig. 19. (A) Amplitud voltaje cortocircuito, (B) Voltaje usando otro sustrato.	24
Fig. 20: Diseño de las capas del prototipo de Baldosa piezoelectrica (SolidWorks)	28
Fig. 21: Capa superior e inferior de la baldosa piezoelectrica (SolidWorks)	28
Fig. 22: Distribución de espacios y ancho de prototipo (SolidWorks).	28
Fig. 23: Dimensionamiento del número de sensores por sección (Proteus).	31
Fig. 24: Conexión de las secciones de sensores en paralelo (Proteus)	31
Fig. 25: Capa superior del prototipo de baldosa piezoelectrica	32
Fig. 26: Placa base del prototipo con su circuito de carga	32
Fig. 27: Etapas de conversión de energía mecánica a eléctrica	33
Fig. 28: Etapa de rectificación y filtrado de voltaje (Proteus)	33
Fig. 29: Circuito regulador de tensión (Proteus)	34
Fig. 30: Circuito de conversión y almacenamiento de energía	34
Fig. 31. Circuito Piezoelectrico equivalente simplificado (Simulink)	35
Fig. 32. Circuito Piezoelectrico valores equivalente (Simulink)	36
Fig. 33.(A) Discos Titanato zirconato de plomo. (B) Equivalente secciones (Simulink)	37
Fig. 34. Equivalente de las 4 secciones de piezoelectricos (Simulink)	38
Fig. 35. (A) Circuito equivalente. (B) Formas de Onda por puente rectificador (Simulink)	38

Fig. 36: Relación Superficie – Volumen	40
Fig. 37: Entorno de desarrollo NI LabVIEW	43
Fig. 38. Formulario de ingreso y visualización de resultados del generador piezoeléctrico.	44
Fig. 39. (A)Flujograma Voltaje, (B) Flujograma capacitancia	45
Fig. 40. Modelamiento del nanogenerador en base a datos del generador piezoeléctrico	46
Fig. 41. Flujograma para el cálculo de generación del nanogenerador	47
Fig. 42. (A) Equivalente piezoeléctrico, (B) Forma de onda alternas (Proteus)	48
Fig. 43. (A) Rectificador de onda completa, (B) Voltaje etapa de rectificación (Proteus)	48
Fig. 44. (A) Voltaje de rizado con 220uF. (B) Voltaje de rizado con 470uF.	49
Fig. 45. Simulación de un nanogenerador	50
Fig. 46. Formas de onda antes y después del puente rectificador	56
Fig. 47. Circuito rectificador de voltaje con su etapa de filtrado	56
Fig. 48. Voltaje de rizado con una capacitancia de 220uF	57
Fig. 49. Conexión de terminales para obtener Voltaje y Capacitancia	59
Fig. 50. Programación del nanogenerador Piezoeléctrico	60
Fig. 51. Programación para conocer el voltaje de un nanogenerador	60

## Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de la serie triboeléctrica	3
Tabla 2. Materiales piezoeléctricos más comunes.	5
Tabla 3. Rendimiento de sustratos piezoeléctricos con fluoruro de polivinilideno.	9
Tabla 4. Rendimiento de nanocables de sustrato óxido de zinc	10
Tabla 5. Rendimiento piezoeléctricos con titanato de bario	10
Tabla 6. Comparación entre nanogeneradores piezo y triboeléctrico	13
Tabla 7. Comparación de la tecnología piezoeléctrica y triboeléctrica	16
Tabla 8. Descripción de los diferentes materiales de generación tribo y piezoeléctrica	17
Tabla 9. Resultados de generación con película de elastómero polidimetilsiloxano	22
Tabla 10. Resultados de generación con polímeros de acrilato	23
Tabla 11. Materiales para ensamblar el prototipo de baldosa piezoeléctrica.	29
Tabla 12. Valores de generación usando la baldosa piezoeléctrica	35
Tabla 13. Resultados de generación piezoeléctrica obtenidos	39
Tabla 14. Resultados de la superficie con respecto al volumen de un cuerpo	40
Tabla 15. Comparación de generadores escala nano vs escala normal	41
Tabla 16. Comprobación del voltaje de un nanogenerador	42
Tabla 17. Controles y funciones en labVIEW	58

## Resumen

La constante búsqueda por suplir los métodos de generación eléctrica convencional por fuentes de energía renovables es cada vez mayor. La energía térmica, química, biológica y mecánica son una opción viable de desarrollo que pueden ser aprovechadas por generadores y nanogeneradores eléctricos. La alta demanda energética por el crecimiento exponencial de la población trae consigo el desequilibrio ambiental y las actuales formas de generación como la termoeléctrica e hidroeléctrica son invasivas con el medioambiente, causando altos índices de contaminación e impactos ambientales. El presente trabajo desarrolla el modelado de un sistema de nanogeneradores basado en los efectos tribo y piezoeléctrico para el mejoramiento de la estabilidad y flexibilidad de generación eléctrica optimizando el aprovechamiento de la energía como una solución de generación sustentable. La investigación se basa en una metodología encaminada a la búsqueda de información a fin de determinar un modelo matemático que permita calcular la cantidad de energía generada a través de los diferentes sustratos. Los resultados obtenidos muestran a los materiales piezoeléctricos predominantes en aplicaciones a gran escala mientras que para los triboeléctricos su desarrollo está basado en prototipos de laboratorio y los materiales son dopados para lograr un mayor desarrollo, resultando con una mayor eficiencia del 60% con  $35 \text{ mW/m}^2$  al usar hidrogel de cloruro de poliacrilamida-litio en un nanogenerador triboeléctrico mientras que un 25% a 50% de eficiencia con  $0,6 \text{ mW/m}^2$  usando Titanato zirconato de plomo en un nanogenerador piezoeléctrico. Finalmente, la investigación y los resultados obtenidos del análisis del potencial de generación a través de los efectos tribo y piezoeléctrico pueden ser aplicados como una opción viable de generación renovable.

**Palabras Claves:** Energía renovable, Generador piezoeléctrico, Nanogeneradores, Piezoeléctricos, Triboelectricidad.

## Abstract

The constant search to replace conventional electricity generation methods with renewable energy sources is increasing. Thermal, chemical, biological and mechanical energy are a viable development option that can be harnessed by generators and electric nanogenerators. The high energy demand due to the exponential growth of the population leads to environmental imbalance and the current forms of generation as thermoelectric and hydroelectric are invasive with the environment, causing high rates of pollution and environmental impacts. The present investigative work develops the modeling of a nanogenerator system based on tribo and piezoelectric effects for improvement of the stability and flexibility of electrical generation optimizing the use of energy like a sustainable generation solution. The research is based on a methodology aimed at searching for information in order to determine a mathematical model that allows calculate the amount of energy generated through the different substrates. The results shows that piezoelectric materials are prevailing in large scale applications while for triboelectric their development is based on laboratory prototypes and the materials are doped to get a higher development resulting in a higher efficiency of 60% with 35 mW/m<sup>2</sup> when using polyacrylamide-lithium chloride hydrogel in a triboelectric nanogenerator while 25% to 50% efficiency with 0.6 mW/m<sup>2</sup> using lead zirconate titanate in a piezoelectric generator or nanogenerator. Finally, the research and the results obtained from the analysis of a generation potential through tribo and piezoelectric effects can be applied as a viable renewable generation option.

**Keywords:** Sustainable energy, Piezoelectric generator, Nanogenerators, Piezoelectrics, Triboelectricity.

# INTRODUCCIÓN

## A1. Contextualización

El crecimiento acelerado de la población dado a conocer por la (CEPAL) y el desarrollo e industrialización conllevan al consumo de grandes cantidades de recursos, la generación de energía es uno de los aspectos más alarmantes debido a los impactos ambientales que deja a su paso, actualmente se está buscando la forma de reemplazar los métodos de generación eléctrica con (combustibles fósiles e hidrocarburos) por fuentes de energía renovable que a su vez contribuyan al cuidado del medio ambiente (Gómez Martínez, 2017).

Existen muchas formas de obtener energía utilizando nuestro propio entorno que son menos invasivas que las usadas en la actualidad, aprovechando así la energía térmica, química, biológica y mecánica (Hu, Yao, Fan, & Ma, 2018). Varios estudios se han enfocado en la recolección de energía mecánica basándose en los efectos electromagnéticos y electrostáticos (Rodrigues, Gomes, Ghosha, & Ventura, 2019). El primer nanogenerador eléctrico (TENG) es uno de los resultados de la constante investigación, este dispositivo convierte energía mecánica externa en electricidad a través de un proceso llamado electrificación de contacto o inducción electroestática. (Askari, Khajepour, Khamesee, & Wang, 2018)

La constante investigación de energía mecánica ha dado paso a los nanogeneradores piezoeléctricos (PENG) elementos capaces de absorber energía mecánica y convertirla en energía eléctrica, estos pueden ser ampliamente distribuidos y aprovechados con el movimiento de los seres humano (Hu, Yao, Fan, & Ma, 2018), pudiendo ser usada para alimentar dispositivos electrónicos e incluso incursionar en la generación de alta potencia (Askari, Khajepour, Khamesee, & Wang, 2018).

Los diferentes estudios determinan que los TENG y los PENG se obtienen de un sinnúmero de fenómenos como: captación energía del viento, de las olas, detección táctil, monitoreo de flujo de tráfico, sistemas de seguridad etc. mostrando varias fortalezas en comparación con otras tecnologías como los generadores electromagnéticos (EMG), demostrando en si mayor eficiencia y un menor costo. (Gómez Martínez, 2017).

El desarrollo de esta tecnología abrió paso a los dispositivos híbridos es decir una combinación de nanogeneradores eléctricos con métodos tradicionales de energía renovable como la solar y eólica. Tal es el caso de la combinación con celdas solares o energía eólica para compensar tensión en casos especiales de caídas de voltaje (Chicana & Sastré, 2016). Estos novedosos nanogeneradores presentan un alto rendimiento, eficiencia, escalabilidad y sobre todo muchas aplicaciones respecto al medio ambiente que nos rodea pudiéndose

integrar en ropa y calzado en caso de los TENG y en carreteras, baldosas, pisos para los PENG (Rodrigues, Gomes, Ghosha, & Ventura, 2019). Sin embargo, a pesar de los diferentes estudios y resultados necesitan más investigación para aumentar la estabilidad y flexibilidad de esta nueva tecnología que sin duda es una fuente para el desarrollo energético (Hu, Yao, Fan, & Ma, 2018).

Las fuentes de energía renovable actualmente son de mucho interés y existen leyes y políticas para el desarrollo de las mismas. La ley orgánica de eficiencia energética en su artículo 22.- Incentivos para la eficiencia energética (Pozo Barrueta, 2019) es una de las leyes ecuatorianas que apoya el desarrollo de nuevas fuentes de generación que a su vez sean, renovables, sustentables, y amigables con el medio ambiente (Pozo Barrueta, 2019). De esta manera los nanogeneradores eléctricos es una de las nanotecnologías más importantes en la actualidad y su implementación a gran escala ofrecería muchos beneficios al desarrollo eléctrico e industrial del país.

## **A2. Planteamiento del problema**

El crecimiento exponencial de la población trae consigo un desequilibrio ambiental, siendo cada vez mayor el consumo de recursos para el desarrollo industrial, es por eso que la utilización de energías renovables pretenden suplir la demanda de consumo eléctrico usando fuentes renovables como: eólica, térmica, biomasa, fotovoltaica e hidroeléctrica. (Ródriguez Mendoza, 2015).

A pesar de que se ha invertido bastante en el aprovechamiento de las fuentes de energía antes mencionadas aún existen varias fuentes de energía menos invasivas como son la mecánica o cinética presente en varios fenómenos naturales que pueden ser aprovechadas por nanogeneradores eléctricos (TENG y PENG) y tratar de suplir un porcentaje del consumo eléctrico diario de la red eléctrica. Cabe mencionar el atraso tecnológico impide desarrollar e investigar nuevas fuentes de energía alternativas rigiéndonos a la producción actual lo que provoca seguir contaminando el medio ambiente. También mencionar la falta de conciencia por cuidar los recursos naturales que tiene nuestro país al seguir generando energía con altos índices de contaminación causando graves impactos al ecosistema, con respecto a los países desarrollados que aprovechan nuevas fuentes de generación con el fin de reducir índices de contaminación (Tamayo Zapata & Cardozo Gutiérrez, 2017).

## **A3. Justificación del trabajo**

La constante contaminación generada por el consumo de recursos no renovables para suplir la demanda energética ha llevado a buscar mejoras a los modelos energéticos tradicionales entre los cuales resalta la energía renovable, esta surge con el propósito de



mitigar las consecuencias negativas que causan la generación de energía a través de combustibles fósiles (Quintero, Fontalvo, & Galvis, 2019).

La energía generada usando nanogeneradores eléctricos en la actualidad es una de las opciones energéticas renovables menos conocidas, pero más prometedora y viables ya que contribuiría a la reducción de la dependencia de energía eléctrica convencional de la red en un porcentaje, aprovechando la energía mecánica y cinética (Arévalo Lizardo & Lamprea Beltrán, 2019).

A diferencia de otro tipo de energía renovable puede ser implementada en cualquier zona con requisitos mínimos de tráfico vehicular y peatonal y cuenta con varias aplicaciones como: baldosas, vías vehiculares y peatonales, tapetes, pistas, gradas, calzado, ropa, entre otros (Arévalo Lizardo & Lamprea Beltrán, 2019). Todo lo mencionado anteriormente no depende de factores geográficos o climáticos como actualmente la energía solar o eólica. (Tamayo Zapata & Cardozo Gutiérrez, 2017).

Por otro lado, actualmente son pocas las universidades con contenido académico e investigativo en nanogeneradores eléctricos como fuente de energía renovable en el país, por lo que se ve la necesidad de promover la investigación de esta tecnología pues una vez que esta se logre estabilizar, representará un avance tecnológico de gran utilidad para el desarrollo local y en un futuro a nivel nacional (Arévalo Lizardo & Lamprea Beltrán, 2019).

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

Esta investigación busca consolidar un modelo matemático que relacione todas las variables del entorno a tomar en cuenta para la generación eléctrica con nanogeneradores basados en el efecto tribo y piezoeléctrico simulando un modelo híbrido en dos capas que aproveche tanto la deformación del material como su rozamiento de esta manera lograr la generación y aprovechamiento de una cantidad mayor de energía.

Se desarrollará el modelado de gráficos representativos de los materiales “semiconductores” usando el software (SolidWorks) los cuales ayudarán a integrar una interfaz gráfica más amigable en simulación los respectivos cálculos y formulación matemática se realizarán usando el software (Matlab) que es un entorno de desarrollo integrado y permite la operación matemáticas basadas en vectores y matrices, funciones y programación orientada a objetos etc. El entorno gráfico de pruebas se consolidará usando el software computacional LabVIEW para poder interpretar los parámetros de entrada, requerimientos y salida resultados obtenidos.

Cabe recalcar que esta investigación brindará pautas para futuras investigaciones y profundización de esta tecnología, la cual es una base que ayudará a estabilizar y flexibilizar

aún más la generación eléctrica con nanogeneradores y al aprovechamiento de este tipo de energía renovable.

#### **A5. Viabilidad del trabajo**

La realización de esta investigación es viable ya que se cuenta con la bibliografía adecuada, acceso a información de modelos y metodologías usando nanogeneradores tribo y piezoeléctricos y lo más importante es entender el principio de funcionamiento y esta información se ha encontrado en (libros físicos y digitales, artículos científicos, tesis, revistas etc.). Además, para la sección de simulación y demostración del modelo matemático la Universidad Técnica del Norte cuenta con la licencia del software LabVIEW, software principal para poder observar los resultados a través de simulaciones.

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

Realizar el modelado de un sistema de nanogeneradores basado en los efectos tribo y piezoeléctrico para aumentar la estabilidad y flexibilidad de generación eléctrica optimizando el aprovechamiento de la energía.

#### **A7. Objetivos Específicos**

- Realizar una comparativa de los materiales y efectos piezo y triboeléctricos y su aplicación como fuente generadora de energía a través de nanogeneradores eléctricos.
- Determinar un modelo matemático que permita calcular la cantidad de energía generada por un nanogenerador tribo y piezoeléctrico en un área determinada.
- Simular el modelo matemático, usando un software computacional para verificar los resultados obtenidos.

# CAPÍTULO 1

## Revisión bibliográfica

### 1.1 Energy harvesting

Son las tecnologías para la obtención de energías renovables la cual convierte la energía solar, térmica o mecánica del ambiente circundante; en energía eléctrica. Con estas tecnologías, podemos obtener suministros de energía sostenible y reemplazar el uso de combustibles fósiles no renovables. Esta tecnología puede clasificarse en celdas fotovoltaicas, dispositivos termoeléctricos y generadores piezo / triboeléctricos. Las células solares son ecológicas y el sol es un recurso permanente, aun así, su generación de energía eléctrica es limitada, dependiendo del clima, el tiempo y el espacio a diferencia de la recolección de energía mediante el fenómeno piezoeléctrico / triboeléctrico que puede generar energía eléctrica basada en fuentes de energía residual y no está restringida por el espacio. La Figura 1 resume la clasificación de las tecnologías de recolección de energía de acuerdo a su fuente de obtención. (Han, Lee, Lin, & Ho, 2019).



Fig. 1. Clasificación de la tecnología de recolección de energía según la fuente de energía.  
Fuente: (Han, Lee, Lin, & Ho, 2019)

Con el uso cada vez mayor de energía verde o renovable existe una creciente demanda de recolección de energía de mayor eficiencia en general de la, energía solar, energía térmica y vibraciones mecánicas. Las células solares se han visto limitadas en condiciones de poca luz a pesar de su excelente densidad de potencia. La energía térmica

es menos eficiente debido al alto consumo de energía. Las vibraciones mecánicas se pueden convertir en energía eléctrica utilizando dispositivos electromagnéticos, electrostáticos y piezoeléctricos. En términos generales los dispositivos piezoeléctricos tienen una alta conversión de energía para la micro cosecha debido a que son muy prometedores para alimentar la electrónica logrando dispositivos electrónicos autoalimentados (Chang & Yang, 2013).

## 1.2 Efecto triboeléctrico

El efecto triboeléctrico es el fenómeno por el cual un material se carga eléctricamente mediante la fricción producida después de entrar en contacto con otro tipo de material. Al producirse contacto entre dos materiales distintos se forman enlaces químicos entre áreas específicas de las dos superficies donde las cargas se mueven de un material a otro para igualar su potencial, las cargas transferidas pueden ser electrones o pueden ser iones. Cuando están separados algunos de los átomos tienden a mantener electrones adicionales y algunos tienden a cederlos produciendo cargas triboeléctricas en la superficie que son la fuerza para impulsar los electrones a fin de equilibrar la caída de potencial eléctrico creada, basándose en este principio la Figura 2 muestra cómo se puede aprovechar este efecto de 4 maneras diferentes. (Wang, 2014).

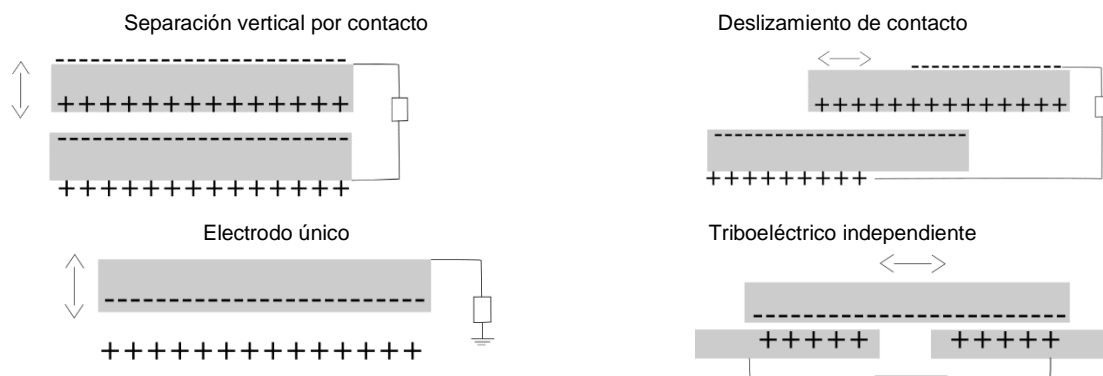


Fig. 2. Modos para aprovechar el efecto triboeléctrico  
Fuente: (Wang, 2014)

Este efecto es tan complejo que no es posible determinar que superficie se cargará positivamente y cuál tendrá cargas negativas incluso cuando las dos superficies se pongan en contacto aún es difícil determinar esta incógnita independientemente de los tipos de modos de contacto triboeléctricos utilizados la carga será efectiva hasta una cierta profundidad para formar la capacitancia del dispositivo.

### ➤ Serie Triboeléctrica

Lo más importante en el efecto triboeléctrico es configurar empíricamente la serie triboeléctrica lo que da una idea general de cómo se llevará a cabo la carga cuando dos materiales cualesquiera se ponen en contacto mediante frotamiento, presión o fricción. Esto

ayuda a simplificar los análisis de triboelectrificación para otras aplicaciones incluidos los nanogeneradores triboeléctricos (TENG), a continuación, en la Tabla 1 se puede observar una lista de las series triboeléctricas más detalladas.

TABLA 1.  
RESUMEN DE LA SERIE TRIBOELÉCTRICA

Cargado más positivamente (+) ▽	Cargado más negativamente (-) Δ
Vidrio	Latón
Mica	Plata
Lana	Oro
Nylon	Poliéster (PET)
Plomo	Poliestireno
Seda	Acrílico
Aluminio	Cloruro de polivinilo
Papel	Silicio
Madera	Polietileno
Ámbar	Polipropileno
Níquel	Teflón (PTFE)
Cobre	Goma de silicona

Fuente: (Pan & Zhang, 2019)

Se ha confirmado que los polímeros que tienen una fuerte tendencia a cargarse positivamente tienen altas constantes dieléctricas y son altamente polares e hidrófilos. Por ejemplo, se encuentra que los polímeros con grupos funcionales oxígeno (más polares) se cargarán de manera más positiva que aquellos con grupos funcionales nitrógeno. Esto demuestra el orden y la secuencia de la Tabla 1 (Pan & Zhang, 2019).

### 1.3 Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico es una propiedad única de ciertos cristales que generan un campo eléctrico o corriente si son sometidos a estrés físico o deformación que se basa en la estructura fundamental de una red cristalina. Ciertas estructuras cristalinas tienen un equilibrio de carga con polarización negativa y positiva que se neutraliza a lo largo del eje polar imaginario, cuando este equilibrio de carga se perturba con una tensión externa sobre la malla de cristal la energía se transfiere mediante portadores de carga eléctrica creando una corriente en el cristal la conexión entre la piezoelectricidad y la simetría de los cristales es directamente proporcional. (Bera, 2016).

El efecto piezoeléctrico se observa en cristales sin centro de simetría y la relación puede explicarse con estructuras monocristalinas y policristalinas. En un monocristal Figura 3 los ejes polares de todos los portadores de carga exhiben características unidireccionales

estos cristales demuestran simetría debido a que los ejes polares a lo largo del cristal los cuales mantendrían su formación unidireccional incluso si se dividiera en pedazos.

En la Figura 4 se puede observar la estructura de un policristal la cual se caracteriza por tener diferentes regiones dentro del material con diferentes ejes polares es asimétrico porque no hay un punto en el que se pueda cortar el cristal que dejaría las dos piezas restantes con los mismos ejes polares resultantes. Para lograr el efecto piezoeléctrico el policristal se calienta hasta el punto de Curie junto con un campo eléctrico fuerte. El calor permite que las moléculas se muevan más libremente y el campo eléctrico obliga a los dipolos a reorganizarse de acuerdo con el campo externo (Bera, 2016).

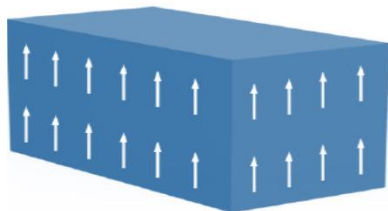


Fig. 3: Monocristal  
Fuente: (Bera, 2016)

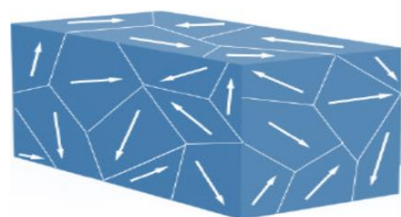


Fig. 4: Policristal  
Fuente: (Bera, 2016)

El efecto piezoeléctrico es lineal la polarización varía directamente con la tensión aplicada y es dependiente de la dirección, las tensiones de compresión y tracción generan campos eléctricos de polaridad opuesta, además el efecto es recíproco, de modo que, si el cristal está expuesto a un campo eléctrico se experimenta una deformación elástica. (Rodríguez Mendoza, 2015).

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno bidireccional, de igual manera que existe el efecto piezoeléctrico directo también existe el efecto piezoeléctrico inverso. En este caso lo que ocurre es que al aplicar un campo eléctrico sobre un material de este tipo este presenta deformaciones físicas.

En la Figura 5 se puede apreciar el esquema del efecto piezoeléctrico directo e inverso. En el caso del efecto directo (a), al aplicar una fuerza mecánica sobre el material se induce una diferencia de potencial mientras que en el caso del efecto inverso (b), al aplicar una diferencia de potencial sobre el piezoeléctrico este cambia de forma (Malmcrona, 2018).

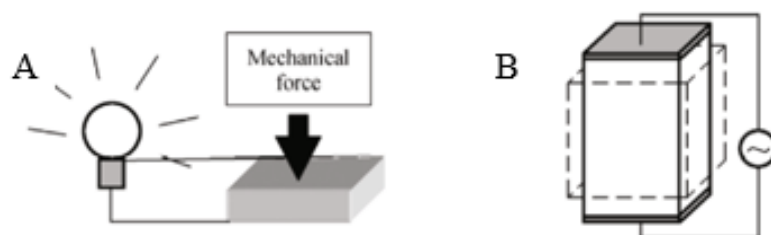


Fig. 5. (A) Efecto piezoeléctrico directo, (B) Inverso  
Fuente: (Malmcrona, 2018)

A parte del efecto directo e inverso en la gran mayoría de los casos se trata de un modelo reversible. Esto quiere decir que al dejar de aplicar presión o una diferencia de potencial al material este vuelve a su estado de reposo. Además, la dirección de la polaridad podemos también determinarla en función que se aplique una fuerza de presión o de tracción. En la Figura 6 se muestra las cuatro formas en función de la excitación que se aplique al material piezoeléctrico y la respuesta que se obtiene (Malmcrona, 2018).

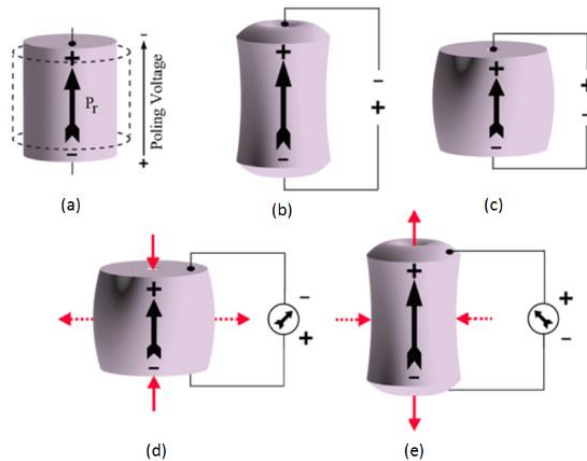


Fig. 6. Respuestas en función del tipo de excitación al piezoeléctrico  
Fuente: (Malmcrona, 2018)

### ➤ Materiales Piezoeléctricos

Son materiales sin centro de simetría a nivel molecular es por eso que se polarizan al deformarse o viceversa. Esto se debe a un desplazamiento de las cargas internas. Principalmente podemos dividir estos materiales en dos tipos: los naturales que son los que se presentan el efecto piezoeléctrico sin tener que adaptarlos o modificarlos y los sintéticos que hay que procesarlos para que presenten el efecto piezoeléctrico en la Tabla 2 se muestran los más comunes de cada tipo.

TABLA 2.  
MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS MÁS COMÚNES.

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

Fuente: (Malmcrona, 2018)

La deformación crea un pequeño dipolo que se observa a nivel molecular y dado que esto ocurre en todo el volumen del sólido se suman todos estos pequeños dipolos llegando a generar un potencial eléctrico cuya dirección depende de la aplicación de la fuerza excitante.

Los dipolos de los monocristales o los dipolos formados por polarización en el caso de los policristales conformados generan una polarización en la superficie del material (Malmcrona, 2018).

### 1.4 Nanogeneradores

Existen generadores basados en los efectos piezoeléctricos, piroeléctricos, triboeléctricos y electrostáticos; la corriente es conducida por la corriente de desplazamiento dentro del generador este tipo de generadores se denomina nanogeneradores que representan físicamente un campo que utiliza la corriente de desplazamiento como la fuerza impulsora para convertir la energía mecánica en una señal eléctrica. Los nanogeneradores funciona mejor a baja frecuencia debido a su alto voltaje de salida, pero baja corriente (Lin, 2019).

En condiciones de baja frecuencia los Nanogeneradores Triboeléctricos son más efectivos para convertir energía desperdiciada y de baja calidad de nuestro entorno en energía eléctrica. Sin embargo, los nanogeneradores piezoeléctricos son muy productivos en gran escala en áreas más grandes y con mayor número de efectos físicos que aprovechar como la deformación, presión y movimiento de los cristales (Lin, 2019).

En la Figura 7 se puede apreciar la corriente de desplazamiento que se genera tanto en los nanogeneradores piroeléctricos, triboeléctricos y piezoeléctricos se puede observar que; en los TENG al poseer dos materiales de distintos tipos existe una corriente de desplazamiento exterior y una corriente de conducción capacitiva en la parte externa es por eso que se define a este tipo de nanogeneradores como los dispositivos que más energía pueden aprovechar de los efectos físicos.

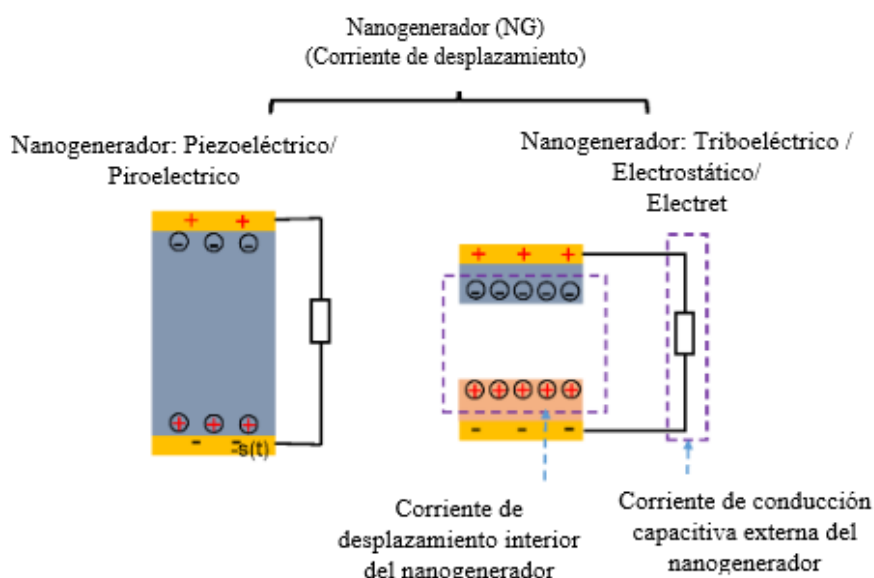


Fig. 7. Desplazamiento de la corriente en los diferentes nanogeneradores  
Fuente: (Lin, 2019)



### 1.4.1 Nanogeneradores Piezoeléctricos

Los (PENG) nanogeneradores piezoeléctricos son dispositivos que utilizan materiales piezoeléctricos para convertir la energía mecánica débil e irregular del ambiente en energía eléctrica. Los materiales piezoeléctricos semiconductores con altos coeficientes piezoeléctricos y altas propiedades de generación son: (ZnO) óxido de zinc, (GaN) nitruro de galio, cerámicas piezoeléctricas nanoestructuradas como (PZT) Titanato zirconato de plomo, también se usa nanopartículas (BaTiO<sub>3</sub>) titanato de bario sin plomo que se han utilizado sucesivamente para construir varios tipos de nanogeneradores piezoeléctricos con diferentes funcionalidades (medidores de flujo, acelerómetros, instrumentación médica, equipos ultrasonido, alarmas) como: sensores, actuadores y transductores. (Hu, Yao, Fan, & Ma, 2018).

Rodríguez Mendoza (2015) demuestra que existen diversos sistemas de generación basados en la piezoelectricidad que se están llevando a cabo y se han implementado en diversas partes del mundo obteniendo excelentes resultados en el aprovechamiento y generación de este tipo de energía se puede detallar los siguientes proyectos:

East Japan Railway Company ha instalado un pavimento piezoeléctrico para la generación de energía eléctrica en el paso de torniquetes y puertas de entrada al metro de Tokio. La superficie total utilizada en el sistema es de aproximadamente 25m<sup>2</sup> y se estima una generación de energía de 0,4 kWh por día. (Rodríguez Mendoza, 2015, pág. 21)

El Instituto de investigación Technion y posteriormente la empresa israelí Innowatech ha desarrollado sistemas de aprovechamiento de energía tanto en tráfico de personas como de vehículos y ferroviario. El sistema de conversión de energía para el tráfico vial se basa en abrir zanjas e introducir una serie de elementos piezoeléctricos quedando su superficie a 3 cm bajo la carretera. Estos nanogeneradores están conectados a unas baterías situadas en el exterior del sistema de manera que la energía quede almacenada y pueda ser inyectada en la red eléctrica. Para hacerse una idea de los datos reales que estos sistemas piezoeléctricos suponen los resultados de las pruebas obtuvieron una generación promedio de 200 kWh por cada kilómetro de carretera equipado con este sistema (600 vehículos a 72 km/h). En el caso del sistema ferroviario se llegó a obtener 120 kWh en los sectores de circulación de 10-20 trenes de unos diez vagones cada uno (Rodríguez Mendoza, 2015, pág. 22).

James Graham y Thaddeus Jusczyk colocaron en la suela de un zapato transductores piezoeléctricos: PVDF y PZT. Las conclusiones fueron para el PVDF una generación de 3 mW por el impacto y para el PZT unos 8,4 mW. Siguiendo esta línea J. Paradiso y N. S. Schenk incorporaron un generador piezoeléctrico al talón de un zapato dedicando la carga

generada a cargar una batería. El dispositivo implantado en el zapato logró obtener una eficiencia del 11 % (Rodríguez Mendoza, 2015, pág. 23).

### ➤ Modelos piezoeléctricos en zigzag.

Según Yang & Han (2015) se puede usar este modelo de configuración para determinar la eficiencia de generación de las estructuras piezoeléctricas. Se coloca una serie de estructuras piezoeléctricas con una capa en zigzag para mejorar la deformación por flexión y compresión como se puede observar en las Figuras 8 y 9 la estructura en zigzag proporciona una tensión normal y un momento de flexión a la matriz del material piezoeléctrico amplía el campo eléctrico debido a un mayor acoplamiento electromecánico.

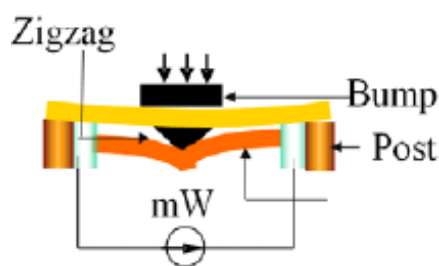


Fig. 8: Estructura Zigzag con un par de materiales piezoeléctrico  
Fuente: (Yang & Han, 2015)

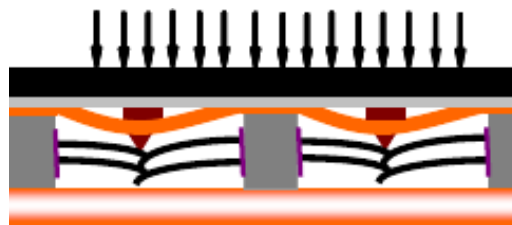


Fig. 9: Capas en zigzag que mejoran la deformación por flexión y compresión.  
Fuente: (Yang & Han, 2015)

### ➤ Comportamiento de generación en los PENG

El comportamiento de generación de energía de nanogeneradores fabricados a partir de materiales semiconductores piezoeléctricos se basa en las propiedades semiconductoras y piezoeléctricas acopladas y se compone de dos procesos que pueden producir energía de CA y corriente continua (CC). La generación de energía a partir de nanogeneradores basados en nanomateriales semiconductores piezoeléctricos varía con las direcciones de fuerza ejercida: perpendicular y paralela al eje del nano cable o el material piezoeléctrico y puede explicarse como generación de energía de CA y CC. (Yang & Han, 2015).

Utilizando el efecto piezoeléctrico en un semiconductor y aplicando una fuerza se puede definir un voltaje en circuito abierto (OC) generado en la región piezoeléctrica  $V_p$

causada por la polarización que se puede obtener de acuerdo con la Ecuación 1 (He, Qian, Rasheed, & Kang, 2018).

$$V_p = T \cdot s \cdot g \quad (1)$$

Donde:

$T$ : es el grosor del material piezoeléctrico

$s$ : es el esfuerzo a lo largo de la dirección de la fuerza aplicada

$g$ : es el coeficiente de voltaje piezoeléctrico.

### ➤ Factores que afectan el rendimiento en nanogeneradores piezoeléctricos

El rendimiento de los nanogeneradores piezoeléctricos está determinado principalmente por los materiales piezoeléctricos utilizados si el material tiene excelentes características piezoeléctricas el rendimiento es alto a la hora de generar y amplificar su voltaje a través de un nanogenerador a continuación se detallan algunos materiales en la Tabla 3. Sin embargo, hay algunos factores que no se pueden ignorar, por ejemplo, el sustrato de nanogenerador piezoeléctrico también puede tener un gran impacto en el rendimiento del dispositivo nanogenerador. (Yao, Fan, Hu, & Liu, 2018).

TABLA 3.  
RENDIMIENTO DE SUSTRATOS PIEZOELÉCTRICOS CON FLUORURO DE POLIVINILIDENO.

Muestra	Morfología	Voltaje de salida (V)		Corriente de salida (nA / cm <sup>2</sup> )	
		Sin dopar	Dopado	Sin dopar	Dopado
Ag-Dopada	P(VDF-HFP) Nano fibras	-	3	-	900
Ce <sup>3+</sup> - Dopada	Nano fibras	-	11	-	6
Eu <sup>3+</sup> - Dopada	(VDF-HFP) películas de doble capa	-	5	-	350
Dopado con óxido de grafeno	P(VDF-TrFE) Nanocompuesto	1.9	4	960	1880
		-	3	-	370

Fuente: (Yao, Fan, Hu, & Liu, 2018).

Se han discutido muchas estrategias para mejorar la producción y aprovechamiento eléctrico de los nanogeneradores piezoeléctricos incluido el desarrollo de nuevos materiales con este efecto: diferentes micro morfologías, dopaje químico y la selección de sustratos adecuados. Sin embargo, estos esfuerzos no pueden cumplir los requisitos de los nanogeneradores piezoeléctricos: flexibilidad y alto rendimiento la mayoría de los materiales

piezoeléctricos tradicional son materiales cerámicos inorgánicos, sin embargo, su estabilidad mecánica y flexibilidad son bajas, además, inhiben las propiedades piezoeléctricas. Se propone el uso de polímeros orgánicos y partículas inorgánicas como los detallados en la Tabla 4 para preparar materiales compuestos de película delgada y mejorar la flexibilidad y el rendimiento del nanogenerador piezoeléctrico por lo tanto el diseño y la fabricación de materiales compuestos de película delgada con flexibilidad y excelentes propiedades piezoeléctricas se han convertido en otra tendencia en el desarrollo de los nanogeneradores piezoeléctricos. (Yao, Fan, Hu, & Liu, 2018)

TABLA 4.  
RENDIMIENTO DE NANOCABLES DE SUSTRATO ÓXIDO DE ZINC

<b>Sustrato</b>	<b>Morfología</b>	<b>Voltaje de salida (V)</b>	<b>Corriente de salida (nA)</b>
PET	Nanocables	2.4	380
Si	Nanocables	0.659	49.7
Poliéster	Nanocables	0.5	200

Fuente: (Yao, Fan, Hu, & Liu, 2018)

El rendimiento de varios generadores piezoeléctricos de película delgada BaTiO<sub>3</sub> se demuestra en la Tabla 5 con su respectivo voltaje y corriente de salida que generan dependiendo de su morfología.

TABLA 5.  
RENDIMIENTO PIEZOELÉCTRICOS CON TITANATO DE BARIO

<b>Sustrato</b>	<b>Morfología</b>	<b>Voltaje de salida (V)</b>	<b>Corriente de salida (nA)</b>
PET	Película delgada BaTiO <sub>3</sub>	6.5	140
Plástico	Película delgada BaTiO <sub>3</sub>	1	26
PDMS	Película delgada BaTiO <sub>3</sub>	2.67	261.40

Fuente: (Yao, Fan, Hu, & Liu, 2018).

El Titanato de bario (BaTiO<sub>3</sub>) conjuntamente con sustratos (PET, Plástico, PDMS) tiene un rendimiento medio como se puede observar los valores de voltaje y corriente en la (Tabla 5), esto se debe a su baja estabilidad mecánica y flexibilidad.

#### 1.4.2 Nanogeneradores Triboeléctricos

Estos nanogeneradores (TENG) convierten la energía mecánica en electricidad mediante la estática. El principio detrás de estos nanogeneradores es el efecto triboeléctrico y se puede definir como la generación de la carga eléctrica al frotar dos materiales triboeléctricos. La fuerza de la carga depende del material, la rugosidad, el área bajo contacto, la temperatura y la tensión. En la Figura 10 se puede apreciar a estos nanogeneradores al juntar dos láminas de materiales; con electrodos en sus espaldas para recoger la carga el

funcionamiento de los nanogeneradores triboeléctricos se da cuando los dos materiales del generador a nano escala se unen, los electrodos que están conectados a sus espaldas se acumulan y la carga fluye, por lo tanto, se crea un potencial. Cuando se presionan las dos hojas haciendo que entren en contacto entre sí, se crea una corriente en una dirección se libera presión y cuando las hojas se separan la corriente fluye en dirección opuesta y, por lo tanto, también se denomina "Generadores de corriente alterna" (Natraj, 2019).

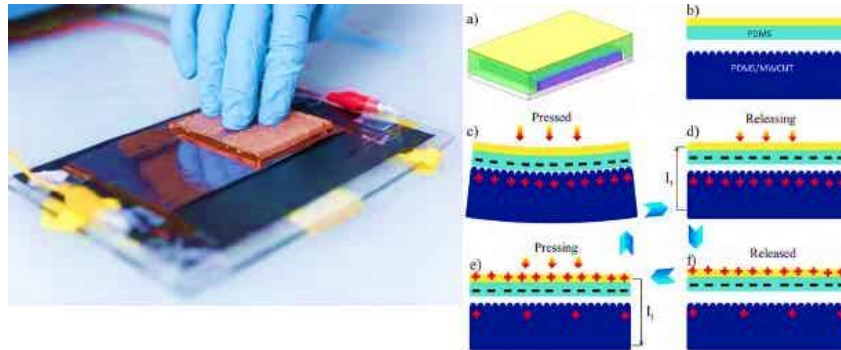


Fig. 10: Funcionamiento de nanogeneradores triboeléctricos  
Fuente: (Natraj, 2019)

Los nanogeneradores triboeléctricos (TEG) proporcionan un enfoque eficaz para convertir la energía mecánica en electricidad en función del efecto de acoplamiento de la electrificación por contacto e inducción electrostática. El principio de funcionamiento de los TEG generalmente se basa en uno de los cuatro modos básicos: el modo de separación por contacto vertical, deslizamiento por contacto, electrodo único (SE) y el modo de capa triboeléctrica independiente (FTL). El modo de separación por contacto vertical utiliza el movimiento relativo perpendicular a dos materiales mientras que el modo de deslizamiento por contacto se basa en el movimiento de deslizamiento entre dos materiales en contacto. Los TEG que trabajan bajo el modo de electrodo único (SE) toman el suelo como referencia y recogen energía de un objeto que se mueve libremente. El modo de capa eléctrica libre (FTL) genera energía debido al efecto de la inducción electrostática entre un par de electrodos simétricos (Xu, Zhao, Shi, & Lu, 2019). El nanogenerador triboeléctrico de electrodo único tiene una estructura similar con el PENG, en la Ecuación 2 (He, Qian, Rasheed, & Kang, 2018), se puede observar que el voltaje que se genera en circuito abierto (OC) en la región triboeléctrica una vez que haya contacto de frotación con el material se puede calcular como:

$$V_t = \frac{1T}{2\epsilon} \sigma q \quad (2)$$

Donde:

$T$ : es el grosor del PDMS (polidimetilsiloxano) o material triboeléctrico

$\epsilon$ : es la permitividad del material dieléctrico

$\sigma q$ : es la densidad de carga superficial

### ➤ Recolectando energía de los movimientos del cuerpo

La naturaleza del cuerpo humano permite movimientos en tres dimensiones. Tal libertad de movimiento brinda flexibilidad al diseñar TENG. Los cuatro modos fundamentales del TENG se pueden adoptar para recolectar energía de los movimientos del cuerpo. En la mayoría de los casos los TENG se unen directamente a las extremidades superiores o inferiores e indirectamente a los textiles o incrustados en plantillas de zapatos para cosechar energías mecánicas del movimiento de las extremidades (brazo, mano, dedo, rodilla y pie) (Xu, Zhao, Shi, & Lu, 2019).

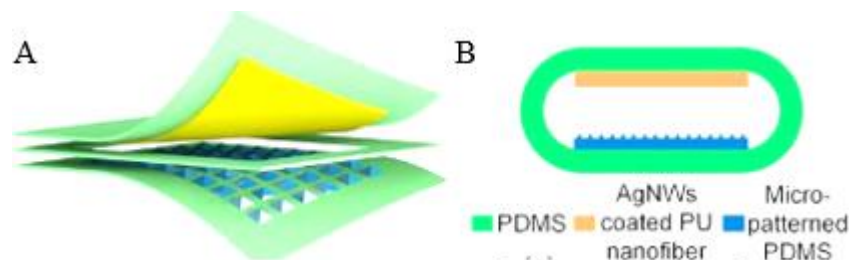


Fig. 11. (A) Esquema estructural Nanogenerador Triboeléctrico. (B) Vista transversal.  
Fuente: ( Zhang, y otros, 2018)

En la Figura 11a y 11b se puede observar la estructura del material que realiza el efecto piezoeléctrico con una vista transversal del mismo el cual actúa en el proceso de recolección de energía con los movimientos del cuerpo humano.

### ➤ Aplicaciones de los TENG

Según Lin Wang (2019) con el uso de nanogeneradores basados en los efectos triboeléctricos muestran que la densidad de potencia de salida de TENG ha mejorado 5 órdenes de magnitud en los últimos años de estudio. La densidad de potencia del área alcanza los  $313 \text{ W} / \text{m}^2$ , la densidad de volumen alcanza los  $490 \text{ kW} / \text{m}^3$  y se ha demostrado una eficiencia de conversión de  $\sim 60\%$ . El TENG se puede aplicar para cosechar todo tipo de energía mecánica disponible pero desperdiciada en nuestra vida diaria como movimiento humano, caminar, vibración, activación mecánica, neumático giratorio, viento, agua que fluye y más (Lin Wang, 2019).

Se desarrolló un VCSTENG que consta de PDMS y nanopartículas de oro en las superficies triboeléctricas con resortes conectados como mecanismo de restauración. El TENG produjo un VOC máximo de 1200 V, un JSC máximo de  $751.2 \text{ mA} / \text{m}^2$  y un POUT máximo de alrededor de  $313 \text{ W} / \text{m}^2$  (a través de una carga de  $1\text{M}\Omega$ ), encendiendo 600 bombillas LED, bajo la influencia de pisadas humanas, aplicando una fuerza de 500 N – 600 N. (Dharmasena & Silva, 2019).

Se propuso un TENG con una capa triboeléctrica Cu-Kapton-Cu ondulada estructurada intercalada entre capas de PTFE nanoestructuradas capaz de recolectar energía

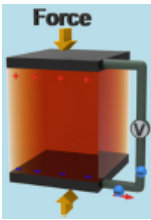
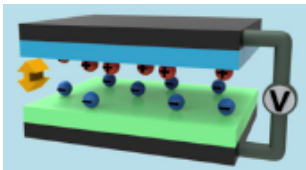
de las ondas de agua. Las ondas de agua causan presión y liberación sobre la estructura TENG lo que resulta en la extensión lateral y la relajación del electrodo de onda ondulado. Esto da como resultado la electrificación por contacto y el movimiento relativo entre los electrodos de Cu y las superficies de PTFE, lo que provoca un flujo de corriente de salida. El TENG se sometió a una condición de onda artificial de altura de onda de 0.2 m a una velocidad de 1.2 m/s produciendo un voltaje pico de 30 V y una corriente de salida máxima de 6  $\mu$ A. El mismo dispositivo se sometió a una vibración de 100 Hz lo que resultó en una densidad de potencia máxima de 0,4 W / m<sup>2</sup>. (Dharmasena & Silva, 2019).

### 1.4.3 Materiales para nanogeneración eléctrica

Un material piezoeléctrico es un material que genera una carga al generar primero una polarización en respuesta a una tensión mecánica convirtiendo las vibraciones y la energía física en energía eléctrica con una eficiencia mucho mayor que la energía termoeléctrica y fotovoltaica. La energía piezoeléctrica es principalmente flexión y vibración, utiliza materiales como: cuarzo, titanato de circonato de plomo (PZT), BTO. También se usa materiales de película delgada que tienen características semiconductoras, como óxido de zinc (ZnO), nitruro de aluminio (AlN) y nitruro de galio (GaN). La eficiencia de los dispositivos de nanogeneración piezoeléctrica es de un 25% a 50%. (Han, Lee, Lin, & Ho, 2019).

Los nanogeneradores triboeléctricos se generan entre la interfaz de dos materiales diferentes este fenómeno también se da entre sólidos y líquidos, entre líquidos y entre líquidos y gases, tienen varios modos de conducción como: presión, vibración, rotación, deslizamiento. Estudios recientes han demostrado que el nylon y la piel humana son positivos, mientras que el politetrafluoroetileno (PTFE), el perfluoroalcoxi alcano (PFA) y el polidimetilsiloxano (PDMS) son materiales negativos cuando se frota. En la Tabla 6 se muestra una breve comparación entre materiales piezoeléctrico y triboeléctrico de acuerdo a varios parámetros de generación (Han, Lee, Lin, & Ho, 2019).

TABLA 6.  
COMPARACIÓN ENTRE NANOGENERADORES PIEZO Y TRIBOELÉCTRICO

Parámetros	Nanogeneradores Piezoeléctricos	Nanogeneradores Triboeléctricos
Estructura		
Fuente de energía	Flexión / Vibración / Presión	Rotación / deslizamiento

	<b>Aislante:</b> Cuarzo, PZT, BTO, VDF, nitruro de boro hexagonal (h-BN), etc.	<b>Materiales positivos:</b> nylon, piel humana, etc.
<b>Materiales</b>	<b>Semiconductores:</b> ZnO, GaN, AlN, Dichalcogenuros de metales de transición (TMDS), etc.	<b>Materiales negativos:</b> PTFE, PFA, PDMS, etc.
<b>Características</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amigable con la naturaleza</li> <li>- Eficiencia: 25 - 50%</li> <li>- Salida: 0.005 mW / cm<sup>2</sup> - 5 mW / cm<sup>2</sup></li> <li>- Aplicaciones: dispositivos implantados en el cuerpo, nodo sensor inalámbrico, dispositivos portátiles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amigable con la naturaleza</li> <li>- Eficiencia: 30 - 60%</li> <li>- Salida: 1W / cm<sup>2</sup></li> <li>- Aplicaciones: dispositivos autoalimentados, y dispositivos portátiles.</li> </ul>

Fuente: (Han, Lee, Lin, & Ho, 2019)

Los nanogeneradores triboeléctricos como los piezoeléctricos son tecnologías nuevas que se vienen experimentando, adaptando e implementando en prototipos tratando de mejorar cada vez su rendimiento existen varios tipos de materiales con ciertas propiedades como las que se muestran en la Tabla 6, sin embargo, cada uno tiene diferentes características y responde a ciertos estímulos dependiendo de su estructura.

#### 1.4.4 Nanogeneradores híbridos

Un concepto de nanogenerador híbrido quiere decir que combina ambos efectos para mejorar la eficiencia de conversión de energía resultante de la integración de diferentes mecanismos de recolección de energía. El nanogenerador triboeléctrico-piezoeléctrico híbrido (TPNG) es capaz de generar tanto triboelectricidad como piezoelectricidad al mismo tiempo. (Zhang, Gong, Zhang, & Brugger, 2018)

Según Fan, Tang, & Wang, (2016) se ha desarrollado nanogeneradores híbridos flexibles que pueden cosechar múltiples tipos de energía simultáneamente estos están basados en los principios del efecto piezoeléctrico y triboeléctrico, logrando un efecto acumulativo.

Según Fan, Tang, & Wang, (2016) diseñaron un nanogenerador híbrido “r -shaped” con película de PVDF, electrodos de nanoestructurados de Al y película de PDMS con micro patrones que se lo puede ver en la Figura 12 combinando el NG piezoeléctrico y el NG



triboeléctrico para mejorar el rendimiento de salida. El voltaje de salida, la densidad de corriente y la densidad de potencia de volumen del NG piezoeléctrico alcanzó 52.8 V, 20.75  $\mu\text{A cm}^2$  y 10.95  $\text{mW cm}^3$  respectivamente; El NG triboeléctrico, 240 V, 3.40  $\mu\text{A cm}^2$  y 2.04  $\text{mW cm}^3$ , respectivamente. A través de un ciclo de generación de electricidad 10 LEDs se operan instantáneamente y una pantalla LCD puede funcionar durante 15s.



Fig. 12: Diseño un nanogenerador híbrido "r-shaped"  
Fuente: (Fan, Tang , & Wang, 2016)

Fan, Tang, & Wang, (2016) demostraron un nanogenerador híbrido que integra un PENG y un TENG Figura 13 los resultados se pueden visualizar en la Figura 14.

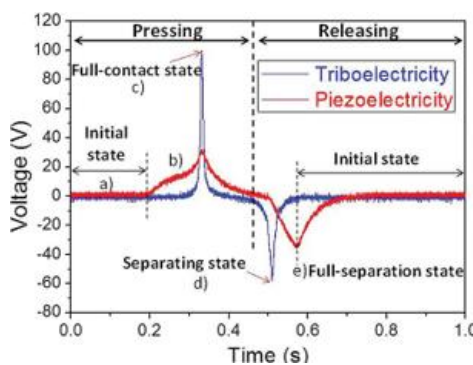


Fig. 13: Híbrido usando efectos piezoeléctricos y triboeléctricos.  
Fuente: (Fan, Tang , & Wang, 2016).

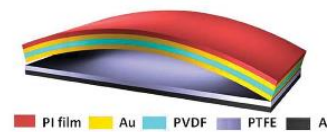


Fig. 14: Híbrido película de fluoruro de polivinilideno y electrodos Politetrafluoroetileno.  
Fuente: (Fan, Tang , & Wang, 2016)

Utilizando una película de Fluoruro de polivinilideno (PVDF), electrodos metálicos y una película de Politetrafluoroetileno (PTFE). El dispositivo combina una alta corriente de salida piezoeléctrica y un voltaje de salida triboeléctrico este generador híbrido produce un voltaje de salida pico de 370 V, una densidad de corriente de 12  $\mu\text{A cm}^{-2}$  y una densidad de potencia promedio de 4.44  $\text{mW cm}^2$  que puede iluminar 600 bombillas LED usando solamente la fuerza de los dedos. ( $\approx 0.2 \text{ N}$ ).

### ➤ Aprovechamiento de los nanogeneradores híbridos

Los nanogeneradores triboeléctricos y piezoeléctricos (TENG y PENG) permiten convertir eficientemente la energía mecánica en electricidad. Los TENG transforman la energía mecánica en electricidad mediante fricción por un efecto acoplado de triboelectrificación e inducción electrostática. Normalmente está compuesto por un par triboeléctrico con electrodos correspondientes.

Los PENG transforman la energía mecánica en electricidad mediante la deformación del material piezoeléctrico intercalado entre dos electrodos lo que induce un potencial piezoeléctrico cuando se aplica una fuerza externa tanto la fricción de contacto como la

deformación de los materiales pueden ocurrir simultáneamente con diseños de estructura apropiados como se observa en la Figura 15.

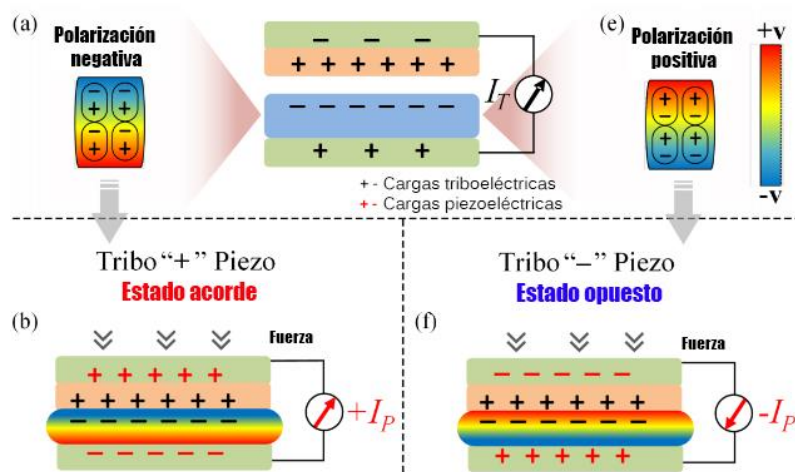


Fig. 15: Aprovechamiento de los nanogeneradores piezo y triboeléctricos  
Fuente: (Zhang, Gong, Zhang, & Brugger, 2018)

Por lo tanto, como para los nanogeneradores convencionales basados únicamente en triboelectricidad o piezoelectricidad la energía mecánica aplicada está parcialmente sin explotar. (Zhang, Gong, Zhang, & Brugger, 2018).

### 1.5 Análisis del efecto tribo y piezoeléctrico

Con el fin de determinar las mejores características de cada tipo de tecnología en la Tabla 7 se detallan varios aspectos a tomar en cuenta al momento de la seleccionar e implementar este tipo de sistemas ya sea en prototipo o como un sistema de generación sustentable.

TABLA 7.  
COMPARACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PIEZOELÉCTRICA Y TRIBOELÉCTRICA

Tecnología	Eficiencia %	Características	Referencias
<b>Piezoeléctrica</b>	Eficiencia de conversión 25 a 50% de generación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aprovecha mayor número de efectos físicos para generar: carreteras, suela de zapatos, baldosas etc. (Lin, 2019).</li> <li>Cerámicas piezoeléctricas nanoestructuradas como (PZT). (Hu, Yao, Fan, &amp; Ma, 2018)</li> <li>Con una superficie de 25 m<sup>2</sup>, se estima 0,4 kWh por día. (Rodríguez Mendoza, 2015, pág. 21)</li> <li>Salida: 0.005 mW / cm<sup>2</sup> - 5 mW / cm<sup>2</sup></li> </ul>	(Han, Lee, Lin, & Ho, 2019).

<b>Triboeléctrica</b>	Eficiencia de conversión de ~60% de generación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En baja frecuencia son más eficientes (Lin Wang, 2019).</li> <li>• Fuerza de la carga depende del material, la rugosidad, el área bajo contacto, la temperatura y la tensión. (Natraj, 2019).</li> <li>• Sus aplicaciones son solo en laboratorio, en su gran mayoría los sustratos usados son dopados.</li> <li>• Salida: 1W / cm<sup>2</sup></li> </ul>
-----------------------	--	--

Fuente: Autor

## 1.6 Descripción de sustratos para generación

Existen varios tipos de elementos naturales y dopados denominados sustratos, estos son usados dentro de los sistemas piezoeléctricos y triboeléctricos para desarrollar generadores o nanogeneradores eléctricos, estos elementos se pueden clasificar en aislantes o semiconductores en la Tabla 8 se puede observar los sustratos comúnmente usados en las aplicaciones antes mencionadas. La selección del material apropiado se define de acuerdo a la eficiencia de conversión, tipo de material y aplicación, disponibilidad y costo (Han, Lee, Lin, & Ho, 2019)

TABLA 8.  
DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES MATERIALES DE GENERACIÓN TRIBO Y PIEZOELÉCTRICA

<b>Efecto</b>	<b>Piezoeléctrico</b>	<b>Triboeléctrico</b>
<b>Materiales</b>	<b>Aislante:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cristales de Cuarzo.</li> <li>➤ PZT: Cerámicas piezoeléctricas</li> <li>➤ BTO: Fibra de Cerámica</li> <li>➤ Nitruro de boro hexagonal.</li> </ul> <b>Semiconductores:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ ZnO: Óxido de zinc</li> <li>➤ GaN: Nitruro de Galio</li> <li>➤ AlN: Nitruro de aluminio</li> <li>➤ Dichalcogenuros de metales de transición (TMDS).</li> </ul>	<b>Materiales positivos:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nylon,</li> <li>- Piel humana</li> </ul> <b>Materiales negativos:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- PTFE: politetrafluoroetileno o teflón</li> <li>- PFA: copolímero de tetrafluoretileno.</li> <li>-PDMS: polidimetilsiloxano</li> </ul>
<b>Referencias</b>	(Han, Lee, Lin, & Ho, 2019)	

Fuente: Autor

De acuerdo al análisis de la tecnología piezo y triboeléctrica y por lo expuesto anteriormente en la descripción de los diferentes sustratos para cada una de las tecnologías que se desee desarrollar para el presente trabajo es necesario usar la tecnología piezoeléctrica como fuente principal de análisis e investigación a través del sustrato PZT (Titanato Zirconato de Plomo) el cual tiene una eficiencia de conversión 25 a 50% de generación (Hu, Yao, Fan, & Ma, 2018), este sustrato es de fácil adquisición y para un prototipo se los puede encontrar en (dispositivos y transductores ultrasónicos), ayudando a extrapolar datos reales con los cálculos del modelo a desarrollar.

Sin embargo, la tecnología triboeléctrica cuenta con un mayor índice de eficiencia de conversión que es de aproximadamente 60% de generación (Lin Wang, 2019), los sustratos detallados en la Tabla 8 describen elementos clasificados como negativos y positivos los cuales en su gran mayoría son elementos químicos que se los obtiene a través de un proceso de dopado y solamente para aplicaciones de laboratorio por lo cual la disponibilidad no es accesible y su costo muy elevado, es por eso que en este trabajo se realiza un análisis detallado de ciertos prototipos de nanogeneradores triboeléctricos desarrollados en varias bibliografías poniendo a consideración el posible desarrollo de esta tecnología para aplicaciones reales en un futuro.

# CAPÍTULO 2

## Determinación del modelo matemático

En este capítulo se presenta el desarrollo para determinar el modelado de los nanogeneradores tribo y piezoeléctricos. Para los TENG se realizó el análisis de la recopilación bibliográfica de modelos, formulación y prototipos existentes en los cuales se pueda evidenciar su construcción, funcionamiento y resultados obtenidos a través de energy harvesting mientras que para los PENG se propone un modelo matemático que ayude a calcular el valor de generación eléctrica que este puede producir, los parámetros y datos para el modelado del nanogenerador piezoeléctrico se obtuvieron del armado de un prototipo de baldosa piezoeléctrico a partir del sustrato Titanato-Zirconato de Plomo PZT con discos piezoeléctricos y a través de la extrapolación de datos se propuso el modelo matemático para un nanogenerador.

### 2.1 Procedimiento para el modelado matemático de los nanogeneradores

Para obtener un modelo válido de los diferentes nanogeneradores el procedimiento a seguir se puede observar en la Figura 16 siendo estos puntos clave para obtener el objetivo propuesto el cual establece determinar un modelo matemático que permita calcular la cantidad de energía generada por un nanogenerador tribo o piezoeléctrico en un área determinada.

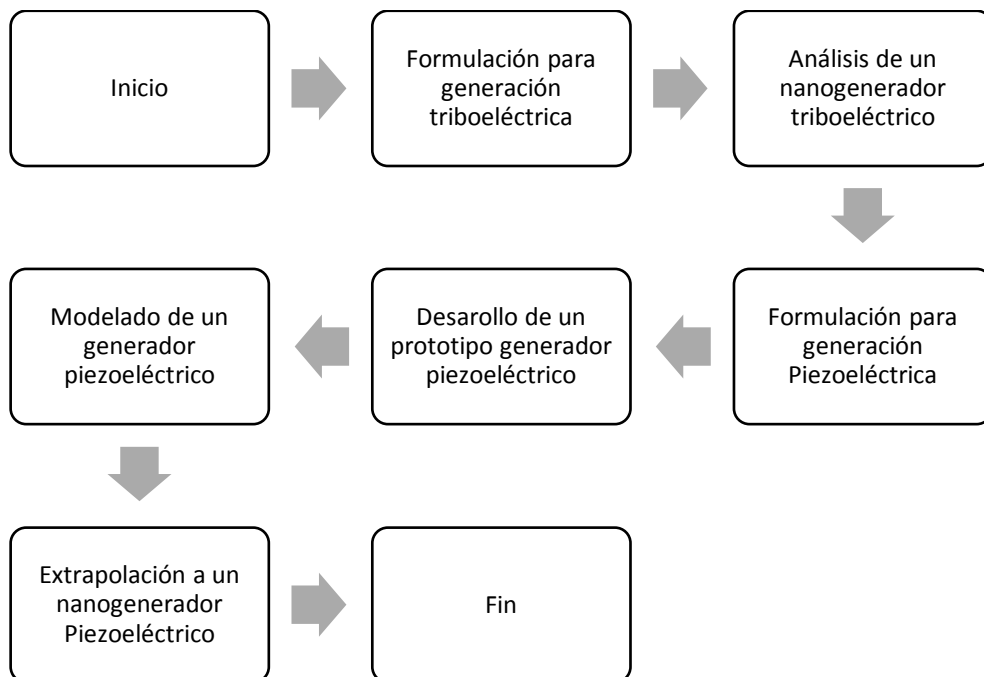


Fig. 16. Procedimiento para el modelado de nanogeneradores Tribo y Piezoeléctricos  
Fuente: Autor

## 2.2 Generación triboeléctrica

Para comprender mejor la generación y nanogeneración triboeléctrica es necesario conocer ciertos factores, variables y formulación que relacionan este fenómeno con los diferentes sustratos a través de la revisión bibliográfica propuesta en otros modelos existentes, los diferentes parámetros que relacionan este tipo de generación se detallan a continuación.

### 2.2.1 Densidad de carga superficial triboeléctrica

Las cargas triboeléctricas son inducidas por transferencia de carga entre dos materiales, experimentos previos demuestran que la densidad de carga superficial sigue una disminución exponencial dada por la Ecuación 3 (Cui, Zhang, Hu, & Zhang, 2020).

$$\sigma = e^{-\alpha t} \cdot \sigma_i \quad (3)$$

Donde

$\sigma$ : es la densidad de carga

$\sigma_i$ : es la densidad de carga superficial inicial

$\alpha$ : es el coeficiente de descomposición.

Cuando  $\alpha$  se ve afectado por la temperatura ambiente del material o la estructura del dispositivo se puede expresar con la Ecuación 4 (Cui, Zhang, Hu, & Zhang, 2020).

$$\alpha = \frac{\lambda_1 \cdot A_0}{k} \cdot T e^{\frac{qV}{kT}} \cdot S \cdot \beta \quad (4)$$

Donde

$\lambda_1$ : es una constante

$T$ : es la temperatura

$q$ : es la carga electrónica

$V$ : es el voltaje

$k$ : es la constante de Boltzmann  $1,380\ 6488(13) \times 10^{-23}$  J/K

$S$ : es el área de superficie

$A_0$ : es a constante de Richardson

$\beta$ : depende del material y la estructura del dispositivo.

Para determinar los valores mencionados en la Ecuación 4 es necesario conocer el valor de  $A_0$  y  $\beta$  los cuales se pueden determinar a partir de las Ecuaciones 5 y 6 (Cui, Zhang, Hu, & Zhang, 2020) denotadas a continuación.

$$A_0 = \frac{4\pi \cdot q \cdot k^2}{h^3} \cdot m \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \rho} \quad (6)$$

Donde

$h$ : es la constante de Planck  $6.63 \times 10^{-34}$  J·s

$m$ : es la masa efectiva de electrones

$\varepsilon_0$ : es la constante dieléctrica al vacío 8,8542 pF/m

$\varepsilon_r$ : es la constante dieléctrica relativa del material triboeléctrico

$\rho$ : es la resistividad volumétrica del material triboeléctrico.

### 2.2.2 Voltaje en circuito abierto

Es el voltaje generado en circuito abierto ( $V_{OC}$ ) en la región triboeléctrica una vez que haya contacto de frotación con el material la Ecuación 7 es una forma de calcular este valor en el caso de usar el sustrato PDMS (He, Qian, Rasheed, & Kang, 2018).

$$Vt = \frac{1T}{2\varepsilon} \sigma q \quad (7)$$

Donde:

$T$ : es el grosor del polidimetilsiloxano PDMS o material triboeléctrico

$\varepsilon$ : es la permitividad del material dieléctrico

$\sigma q$ : es la densidad de carga superficial.

### 2.3 Análisis de un nanogenerador triboeléctrico transparente ultra estirable

Pu, y otros, (2017) desarrollaron un nanogenerador triboeléctrico transparente ultra estirable (STENG) adoptando una arquitectura tipo sándwich como se ilustra en la Figura 17 usando un hidrogel de electrolito de polímero de cloruro de poliacrilamida-litio (PAAm-LiCl) unido a un alambre de Cobre (Cu) o una correa de Aluminio (Al) para lograr una conexión eléctrica sellado entre dos películas de elastómero polidimetilsiloxano (PDMS) o polímeros de acrilato (VHB) denominados PDMS-STENG y VHB-STENG respectivamente. El espesor de la película de hidrogel es de aproximadamente 2 mm y las dimensiones de PDMS o VHB que se usó son de aproximadamente 90mm por 130mm respectivamente.

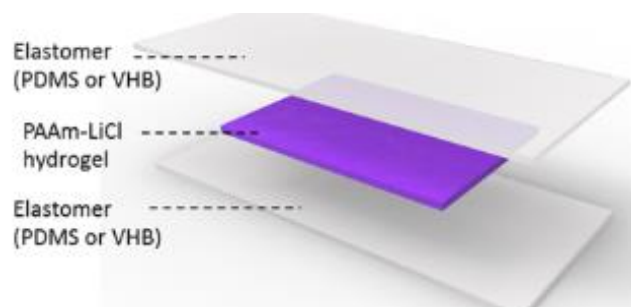


Fig. 17. Estructura nanogenerador triboeléctrico transparente ultra estirable  
Fuente: (Zhang, y otros, 2017)

El STENG tiene un comportamiento capacitivo debido a que es un sistema electrostático, este puede ser equivalente a un circuito de capacitores en serie. La tensión de salida en condiciones de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) se puede determinar mediante la Ecuación 8 (Zhang, y otros, 2017) y las cargas transferidas en condiciones de cortocircuito ( $Q_{SC}$ ) tienen una relación con dicha ecuación.

$$Q_{SC} = V_{OC} \cdot C_o \quad (8)$$

Donde

$C_o$ : es la capacitancia de la STENG

$V_{OC}$ : es el voltaje en circuito abierto

$Q_{SC}$ : es la carga en Circuito abierto.

Cuando la película dieléctrica en movimiento está en contacto con el elastómero  $V_{OC}$  y  $Q_{SC}$  son cero y cuando la película dieléctrica se aleja  $V_{OC}$  y  $Q_{SC}$  pueden derivarse como se propone en las Ecuaciones 9 y 10 (Zhang, y otros, 2017).

$$V_{OC} = \frac{\sigma A}{2C_o} \quad (9)$$

$$Q_{SC} = \frac{\sigma A}{2} \quad (10)$$

Donde

$\sigma$ : es la densidad de carga electrostática en la superficie de la película de elastómero

$A$ : es el área de contacto entre la película dieléctrica y la película de elastómero.

Para medir la salida del STENG usaron una película de nylon para tener un movimiento de separación de contacto con una velocidad de 0,2ms controlada mediante un motor paso a paso. Las condiciones de las pruebas que realizaron fueron bajo una frecuencia de 1,5Hz y una presión aproximadamente 100kPa en la Tabla 9 se muestra los resultados de las pruebas que fueron aplicadas al STENG.

TABLA 9.  
RESULTADOS DE GENERACIÓN CON PELÍCULA DE ELASTÓMERO POLIDIMETILSILOXANO

<b>Elastómero</b>	<b><math>V_{OC}</math> pico</b>	<b><math>Q_{SC}</math> pico</b>	<b><math>I_{cc}</math></b>	<b>R</b>	<b><math>P_{max}</math></b>
PDMS-STENG	145V	47 nC	1,5 mA	70M $\Omega$	35 mW $m^2$

Fuente: (Zhang, y otros, 2017)

Zhang, y otros, (2017) realizaron diferentes pruebas reemplazaron la película dieléctrica móvil por un segundo electrodo metálico que conectado al hidrogel PAAm-LiCl a través del circuito externo los resultados al usar una lámina de Al se pueden observar en la Tabla 10 la lámina de Al la usaron como un segundo electrodo.



TABLA 10.  
RESULTADOS DE GENERACIÓN CON POLÍMEROS DE ACRILATO

Elastómero	$V_{oc}$ pico	$Q_{sc}$ pico	$I_{cc}$	R	$P_{max}$
VHB-STENG	182V	130 nC	20 mA	7M $\Omega$	328 mW m <sup>2</sup>

Fuente: (Zhang, y otros, 2017)

### 2.3.1 Separación de contacto por electrodo único

Cuando el cloruro de litio (PAAm-LiCl) se conecta por un cable metálico al suelo a través de la carga externa el STENG trabaja en modo electrodo único como se puede apreciar en la Figura 18, si el material dieléctrico entra en contacto con la película de elastómero del STENG la electrificación se produce en la interfaz y genera la misma cantidad de cargas con polaridades opuestas en la superficie de la película dieléctrica y el elastómero respectivamente como se puede observar en la Figura 18A. Debido a que las dos cargas opuestas coinciden casi en el mismo plano no hay prácticamente ninguna diferencia de potencial eléctrico entre las dos superficies. Al separar y mover las dos superficies las cargas estáticas de la superficie del elastómero aislante inducen el movimiento de los iones del hidrogel para equilibrar las cargas estáticas formando una capa de iones excesivos positivos en la interfase como se observa en la Figura 18B mientras tanto en la interfaz del hidrogel se polarizará formando la misma cantidad de iones negativos excesivos en la interfaz y de cargas positivas en el hilo metálico como se puede observar en la Figura 18E (Zhang, y otros, 2017).

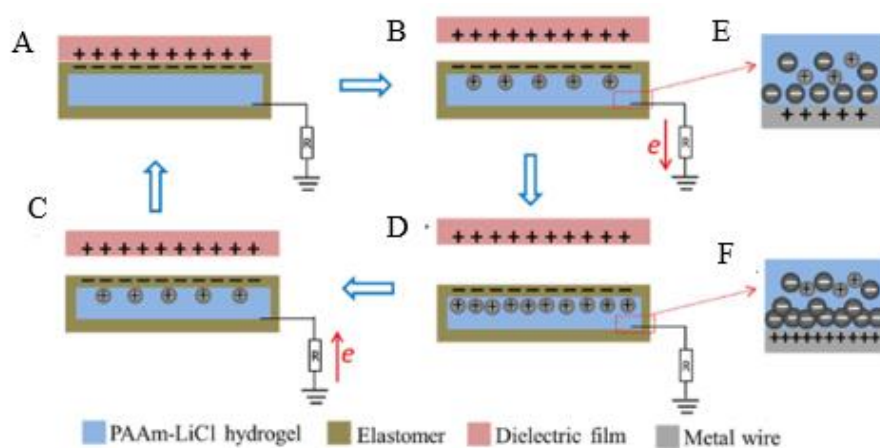


Fig. 18. Esquema de funcionamiento del Nanogenerador ultra estirable.  
Fuente: (Zhang, y otros, 2017)

Para lograr esta doble capa los electrones fluyen desde los cables metálicos hasta el suelo a través de los circuitos externos hasta que todas las cargas estáticas de la película de elastómero son apantalladas como se puede apreciar en la Figura 18D, si la película dieléctrica en movimiento se aproxima de nuevo a la película de elastómero todo el proceso quedará sin efecto y un flujo de electrones con la dirección opuesta se transferirá desde el suelo a la interfaz metal/hidrogel a través de la carga externa como se observa en la Figura

18F y al repetir el movimiento de separación de contacto entre el objeto dieléctrico y el STENG se generará una corriente alterna.

### 2.3.2 Resultados del nanogenerador triboeléctrico ultra estirable

Utilizaron una serie de materiales para tener un movimiento de separación de contacto relativo al STENG en un solo electrodo y se registraron los voltajes de circuito abierto correspondientes Figura 19a. La amplitud y polarización de  $V_{oc}$  dependen de la capacidad relativa de un material para perder o ganar electrones cuando entra en contacto con el elastómero.

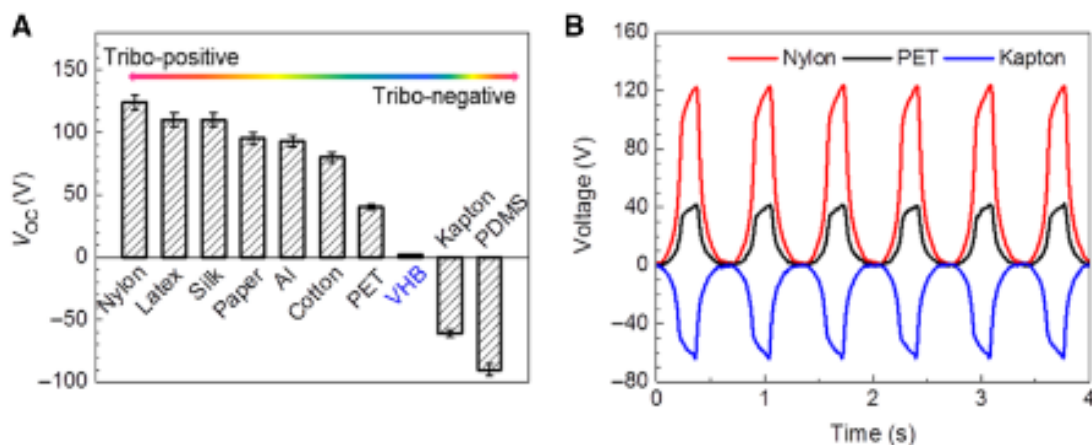


Fig. 19. (A) Amplitud voltaje cortocircuito, (B) Voltaje usando otro sustrato.  
Fuente: (Zhang, y otros, 2017)

En comparación con VHB (polímeros de acrilato) todos los de nylon (poliamida), látex, seda, papel, aluminio, algodón y poliéster (PET) tienden a perder electrones y por lo tanto son más tribo-positivos mientras que el Kapton y el PDMS son más tribo-negativos y la polarización del  $V_{oc}$  se invierte como se puede observar en Figura 19b debido a que PDMS es más tribo-negativo que VHB. Entonces el PDMS-STENG tiene una salida relativamente mayor de voltaje que la de VHB-STENG cuando se usaron los mismos materiales para el movimiento de separación de contacto.

### 2.4 Generación piezoeléctrica

Para plantear un modelo matemático es necesario la recopilación de información de varios modelos propuestos en diferentes referencias bibliográficas los cuales serán la base fundamental para obtener las fórmulas que relacionen todos los parámetros que interactúan al momento de convertir energía mecánica a energía eléctrica con dispositivos piezoeléctricos a través de energy harvesting las ecuaciones que relacionan el funcionamiento de estos sustratos a través de este efecto se detallan a continuación.

### 2.4.1 Módulo de Young

El módulo de Young o módulo de elasticidad del material se puede conocer usando la Ecuación 11 los parámetros se obtienen de las Ecuaciones 12 y 13 (Rayas, Rodriguez, & Martinez, 2003).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (13)$$

Donde

$\sigma$ : es el esfuerzo unitario

$\varepsilon$ : es la deformación unitaria

$P$ : es la carga aplicada (N)

$A$ : es el área sobre la cual actúa la carga (m<sup>2</sup>)

$\delta$ : es la deformación total en (m)

$L$ : es la longitud original (m).

Es necesario que el módulo de Young del piezoeléctrico sea lo más bajo posible para que el voltaje generado sea mayor. En otras palabras, a mayor módulo de Young menor es la deformación del material para cada fuerza, área y espesor constantes y si el material se deforma menos el voltaje generado es menor (Rayas, Rodriguez, & Martinez, 2003).

### 2.4.2 Voltaje en función de la fuerza aplicada

El voltaje que entrega la fuente del modelo eléctrico de un disco piezoeléctrico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el piezoeléctrico en el caso de un piezoeléctrico de disco con un diámetro al menos 5 veces mayor que su espesor compuesto por PZT a una baja frecuencia se puede determinar con la Ecuación 14 (Malmcrona, 2018).

$$V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{t}{d^2} \cdot g_{33} \cdot F \quad (14)$$

Donde

$V$ : es la diferencia de potencial

$t$ : es el espesor de la cerámica piezoeléctrico

$d$ : es su diámetro

$g_{33}$ : es la constante piezoeléctrica  $2 \times 10^{-3}$

$F$ : es la fuerza aplicada sobre el transductor.

### 2.4.3 Capacitancia del material piezoeléctrico

Para la caracterización de un material piezoeléctrico es necesario obtener su capacitancia con el fin de modelar al dispositivo usando este valor referencial, dicho valor es posible calcularlo usando la Ecuación 15 (Malmcrona, 2018).

$$C = \frac{4}{\pi} \cdot K_3^T \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d^2}{t} \quad (15)$$

Donde

$\epsilon_0$ : es la permitividad del vacío  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m

$K_3^T$ : es la constante dieléctrica relativa.

### 2.4.4 Densidad de carga

Los experimentos realizados por los hermanos Curie demostraron que la densidad de carga en la superficie del material al aplicar una fuerza externa es proporcional a la tensión mecánica aplicada al material como se indica en la Ecuación 16 (Sotelo Delgadillo & Nieto Cañón).

$$P = d \cdot T \quad (16)$$

Donde:

$P$ : es la densidad de carga en la superficie del material

$d$ : es el coeficiente de deformación piezoeléctrica [m/V]

$T$ : es la tensión mecánica [Newton/metros<sup>2</sup>].

## 2.5 Diseño del prototipo de baldosa piezoeléctrica

Con el fin de lograr un diseño representativo del prototipo de baldosa piezoeléctrica se usó diferentes software para lograr un desarrollo y explicación del modelado a detalle, algunos de los simuladores y software para ingeniería cuentan con licencias y otros con una versión estudiantil gratuita con todas las funciones necesarias para realizar un modelado representativo gráfico y las herramientas necesarias para lograr un diseño de un prototipo sólido a continuación se detallan los software utilizados.

### 2.5.1 SolidWorks

SolidWorks es un software CAD que permite el modelado mecánico en 2D y 3D permitiendo modelar cualquier pieza o conjunto, este software permite extraer los planos técnicos o caras de cada modelo con información detallada necesaria para la producción o armado físico. Para este prototipo de baldosa piezoeléctricos se usó la versión del Software

SOLIDWORKS Student Edition que es una versión gratuita, pero trae todos los módulos necesarios para realizar los modelos este software también permite realizar simulaciones del comportamiento de cada material o pieza permitiendo definir características propias de cada material y así simular su comportamiento dependiendo del estímulo que se le aplique.

### **2.5.2 Proteus 8 Professional**

Proteus Professional es un entorno integrado de desarrollo y simulación de proyectos electrónicos que ayuda a la depuración y construcción de circuitos a través de una interfaz gráfica haciéndolo así uno de los softwares más didácticos a la hora de usar cuenta con varias bibliotecas con todos los dispositivos electrónicos y con un módulo de diseño de nuevos dispositivos en caso de no encontrarlos en sus amplias librerías. Este software ayudará a realizar la construcción y simulación del circuito de carga que se conectara a la salida del prototipo de baldosa piezoeléctrico este ayudará a conocer y medir los valores de voltajes y corrientes que se generarán a partir de un modelado eléctrico de los dispositivos piezoeléctricos también se usara para conocer las diferentes formas de ondas generadas por cada etapa de circuito regulador de carga.

### **2.5.3 Simulink**

Es un entorno de programación visual que compila sobre el entorno de Matlab es una herramienta de simulación de modelos o sistemas con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos. Permite modelar cualquier tipo de sistema ya sea eléctrico, mecánico o físico. Este software cuenta con un sinnúmero de librerías y componentes para modelar sistemas físicos reales se usó este software para modelar los dispositivos piezoeléctricos y también para simular el circuito de control de tensión de esta manera realizar una comparativa de valores de generación en (simulación) tanto en el software Simulink como en el software Proteus y así tener una perspectiva del margen de error promedio a la generación con un modelo real.

## **2.6 Desarrollo del prototipo piezoeléctrico**

En las Figuras 20 y 21 se puede observar el diseño de la baldosa piezoeléctrica realizado usando el software SolidWorks el mismo que cuenta con herramientas necesarias para lograr un nivel de detalle adecuado. Con los criterios de diseño para la baldosa piezoeléctrica se obtiene como resultado una baldosa cuadrada de 30cm x 30cm que en su interior o (base) posee 16 elementos piezoeléctricos cada uno sobre una base plástica (PET) para evitar daños por la presión constante de igual manera la parte superior de la baldosa cuenta con 16 elementos plásticos para que la presión sea lo más uniforme posible sobre el

material piezoeléctrico, cabe mencionar que las dos capas de material aislante son de madera (tríplex) de 1 cm de espesor.



Fig. 20: Diseño de las capas del prototipo de Baldosa piezoeléctrica (SolidWorks)  
Fuente: Autor

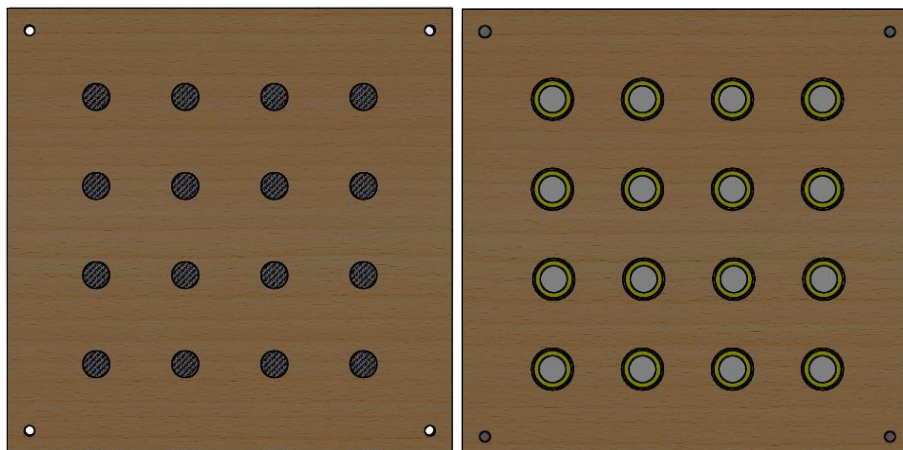


Fig. 21: Capa superior e inferior de la baldosa piezoeléctrica (SolidWorks)  
Fuente: Autor

Para asegurar que la presión ejercida por cada pisada llegue directamente a los piezoeléctricos y sea lo más uniforme posible estos se dispusieron en cuatro secciones con 4 dispositivos cada una, cada dispositivo tiene un diámetro de 27mm y la base plástica es de 26mm en la capa superior se colocó de igual manera cuatro secciones con 4 plásticos PET cada una situada al centro de cada dispositivo como se puede apreciar en la Figura 22 estas tienen un diámetro de 20mm para lograr ejercer la presión solamente en el sustrato piezoeléctrico PZT.

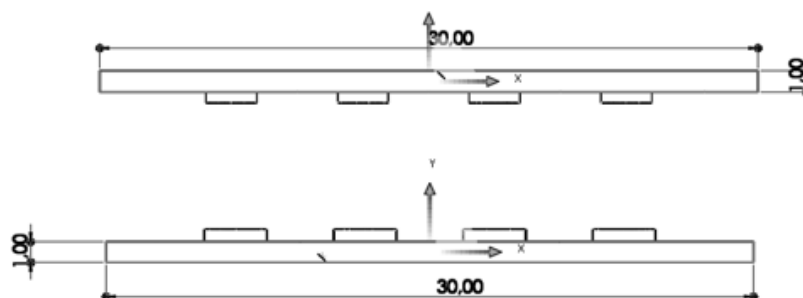


Fig. 22: Distribución de espacios y ancho de prototipo (SolidWorks).  
Fuente: Autor

Las dimensiones del disco piezoeléctrico PZT son de 27mm de diámetro, pero solamente 20mm de su sección contiene el sustrato piezoeléctrico por ende los plásticos de presión PET de la capa superior o tapa de la baldosa piezoeléctrica son de menor dimensión para lograr aplicar la fuerza solo en el centro del sustrato.

### 2.6.1 Selección de materiales para construcción del prototipo

Se determinaron los materiales más idóneos para el ensamblaje de la baldosa dividiendo está en dos partes: la primera la capa superficial de material reciclado (trípex) con los cauchos de presión PET y la segunda la capa que sostiene y presiona los piezoeléctricos, cuenta con un circuito externo para la conversión y almacenamiento de la energía generada y por último los pernos que realizan la función de retorno de presión. Cada uno de los materiales y elementos utilizados se detalla en la Tabla 11. Cabe mencionar que el dimensionamiento para cada dispositivo electrónico seleccionado se puede ver en el Anexo A.

TABLA 11.  
MATERIALES PARA ENSAMBLAR EL PROTOTIPO DE BALDOSA PIEZOELÉCTRICA.



Este material no presenta propiedades conductoras se comporta como un dieléctrico y cuenta con un factor de conductividad de 0.12 - 0.04k (W/mK) con un espesor de 1cm (Jaramillo, López, & Muñoz, 2018).



Acoples plásticos de PET de 20mm de diámetro para la capa superior y 26mm para la base es un material no conductor, realiza la presión en la zona que contiene el sustrato piezoeléctrico PZT. Los PET de la base se colocaron con el fin de que no haya contacto directo con el trípex y la presión sea uniforme para no deteriorar el piezoeléctrico con el tiempo.



Titanato-Zirconato de Plomo (PZT)

- Disco cerámico piezoeléctrico 27mm
- Ref. DH35.453/35
- Diámetro ( $d$ )  $\varnothing$  27 mm
- Espesor ( $t$ ) 1 mm
- Frecuencia de resonancia 2'3 kHz
- Impedancia (resonancia) 300  $\Omega$
- Capacidad (a 1kHz) 25.000 pF

---

MATERIALES PARA ENSAMBLAR EL PROTOTIPO DE BALDOSA PIEZOELÉCTRICA.

---

- Constante de carga piezoeléctrica  $d_{33} 460 \times 10^{-12} \frac{m^2}{N}$
  - Constante de tensión piezoeléctrica  $g_{33} 2 \times 10^{-3} \frac{Vm}{N}$
  - Constante dieléctrica relativa  $\epsilon^T 1850$  (Jaramillo, López, & Muñoz, 2018).
- 



Pernos metálicos lisos de 3cm colocados en las cuatro esquinas de la baldosa con el fin de mantener las dos capas estables y con una presión uniforme.

---



Puente de diodos, ayudara a rectificar la corriente alterna en CD para pasar a la etapa de filtrado de voltaje.

- Modelo: 2W10
  - Voltaje de pico inverso (Max): 1000 Volts
  - Máxima corriente promedio: 2 A
- 



Capacitor electrolítico, este ayuda a filtrar el voltaje DC una vez rectificado por el puente de diodos, las características importantes de este dispositivo son:

- 220 uF/16v
- 



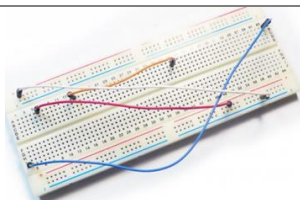
Diodo 1N4007 ayuda a dirigir la corriente a la carga en una sola dirección, la batería no se descargará durante la conexión con el circuito.

- $V_R$ : 1000V
  - $I_R$ : 50nA
  - $I_{max}$ : 1A
  - $V_F$ : 0.7 - 1V
- 



Batería li-ion para la etapa de almacenamiento; una vez filtrado el voltaje la corriente que pase por el diodo 1N4007 cargará a la batería de manera progresiva.

- Voltaje 3.7v
  - 350 mAh
- 



Placa Protoboard y Cables Dupon de conexión, ayudarán en la conexión de los diferentes dispositivos.

---



## 2.6.2 Ensamblado de la baldosa

La baldosa diseñada cuenta con dieciséis discos piezoeléctricos (PZT) agrupados en 4 piezoeléctricos por sección con el fin de contrarrestar voltajes negativos y aumentar el voltaje de generación. En la Figura 23 se puede observar claramente las agrupaciones realizadas de manera horizontal y cada sección cuenta con una conexión en paralelo las cuales se conectarán a las salidas de esta manera tener un voltaje más controlado y listo para pasar a la etapa de rectificación.

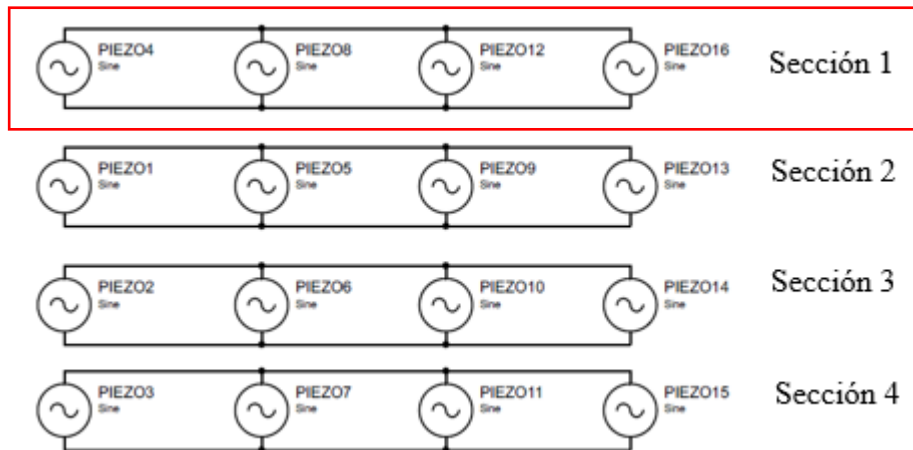


Fig. 23: Dimensionamiento del número de sensores por sección (Proteus).  
Fuente: Autor.

Se decidió utilizar una conexión en paralelo por cada sección como se puede observar en la Figura 24 y teniendo en cuenta que los sensores piezoeléctricos generan corriente alterna se le agregó al circuito un puente rectificador con el fin de no permitirle el paso a los posibles voltajes negativos generado por los piezoeléctricos evitando de esta manera que los voltajes se cancelen como sucedería en una conexión en serie.

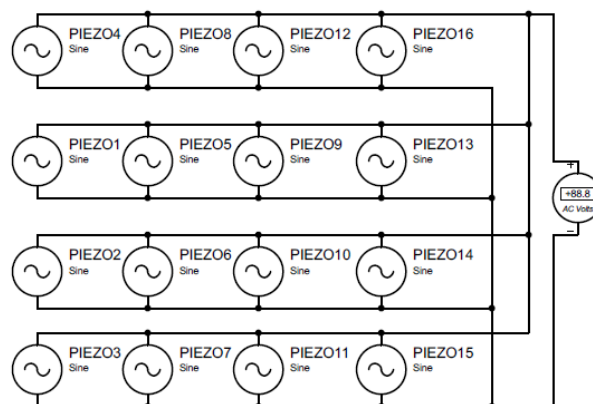


Fig. 24: Conexión de las secciones de sensores en paralelo (Proteus)  
Fuente: Autor

En la conexión en paralelo si la presión es uniforme en cada sección los discos piezoeléctricos actúan como una fuente acumuladora independientemente si uno o más discos son presionados habrá una generación de voltaje. Esto no es lo mismo en una

conexión en serie ya que si en uno de los discos no hay presión la salida se reduce a cero o a un voltaje negativo perjudicando el voltaje generado.

### ➤ **Capa Superior**

Es la capa pulsadora el material PET va adherido a la tapa de la baldosa directamente en 16 puntos para hacer presión sobre los 16 piezoeléctricos sobre los cuales se va a concentrar toda la fuerza recibida a través de la tapa la cual cuenta con un espesor de 1cm logrando distribuir la fuerza a lo largo de toda la baldosa tratando que todos los sensores reciban la pulsación al mismo tiempo en la Figura 25 se puede observar la distribución de los PET sobre la placa de tríplex.

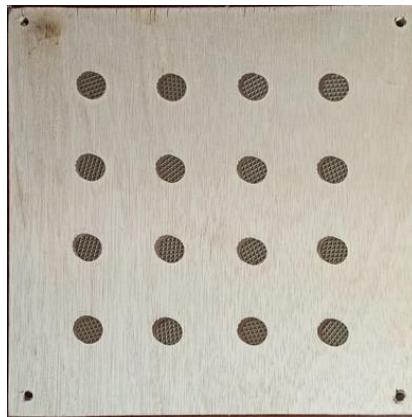


Fig. 25: Capa superior del prototipo de baldosa piezoeléctrica  
Fuente: Autor

### ➤ **Capa Inferior o Base**

Como se puede apreciar en la Figura 26 la base de tríplex con un espesor de 1cm los sensores piezoeléctricos junto con los PET de protección van adheridos a esta madera y la base mantiene los sensores estables también en esta base se encuentra el cableado en paralelo de los 16 piezoeléctricos y además la conexión directa hacia el circuito de conversión y almacenamiento de energía.



Fig. 26: Placa base del prototipo con su circuito de carga  
Fuente: Autor

### 2.6.3 Diseño del circuito de almacenamiento de energía

A partir de los discos piezoeléctricos es necesario desarrollar ciertas etapas para obtener un generador de energía más eficiente, este prototipo cuenta con cinco etapas de desarrollo las cuales se pueden observar en la Figura 27.

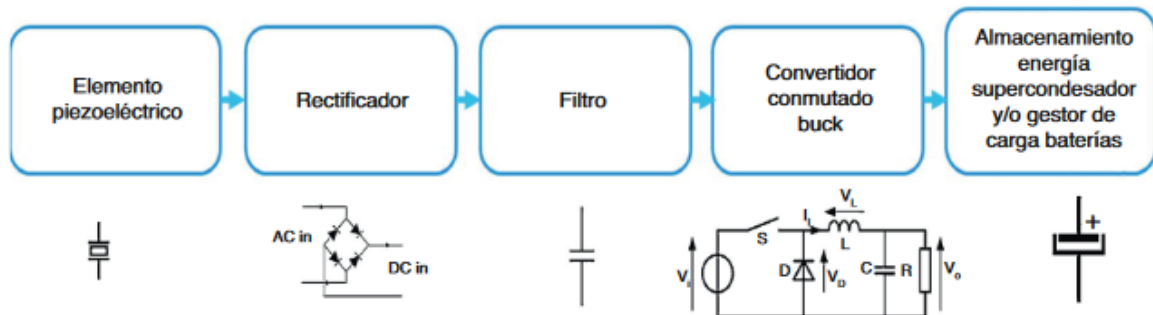


Fig. 27: Etapas de conversión de energía mecánica a eléctrica  
Fuente: (Malmcrona, 2018)

El prototipo de baldosa piezoeléctrico propuesto omite la etapa 4 con el fin de minimizar las pérdidas por el cableado y el circuito en sí, se colocó directamente a continuación la etapa de carga en este caso una batería de 350mAh.

#### ➤ Etapa piezoeléctricos y rectificación

Se trató mediante repetidas pruebas que el esfuerzo sea el mismo en cualquier punto de su superficie de esta manera se aprovecha la forma geométrica de los sensores al máximo. Se evalúa el tipo de conexión entre los sensores piezoeléctricos los cuales generan corriente alterna, considerando lo dicho anteriormente se decide utilizar una conexión en paralelo como se puede apreciar en la Figura 28. Se conectó al circuito un puente rectificador compuesto por cuatro diodos con el fin de no permitir el paso a los posibles voltajes negativos producidos por los sensores piezoeléctricos, evitando de esta manera que los voltajes se cancelen como en el caso de la conexión serie (Malmcrona, 2018).

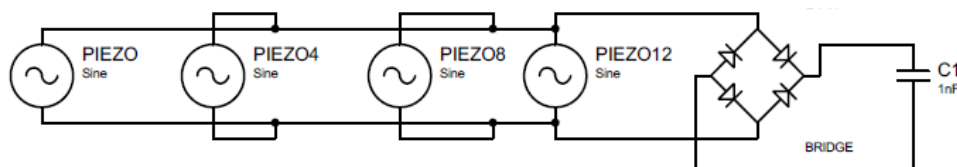


Fig. 28: Etapa de rectificación y filtrado de voltaje (Proteus)  
Fuente: Autor

Se estructuraron cuatro secciones paralelas de 4 piezoeléctricos cada uno con su respectivo puente de diodos para evitar voltajes negativos y un capacitor para filtrar el voltaje generado por cada conjunto de piezoeléctricos. Los cuatro conjuntos de piezoeléctricos se conectarán en paralelo para evitar perder el voltaje generado.

### ➤ Etapa de Filtrado

A la salida de la etapa de rectificación existe una salida en DC es necesario tener un voltaje estable en la salida con el fin de alimentar una carga o simplemente almacenar este voltaje. El propósito de este prototipo es almacenar el voltaje en una batería para posteriormente poder utilizarla. En la Figura 29 se puede observar el circuito para realizar el proceso de carga a través de un regulador simple de tensión.

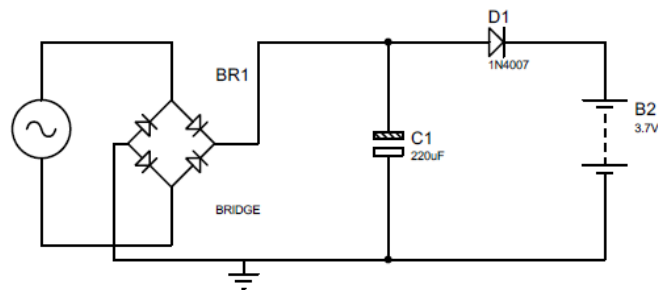


Fig. 29: Circuito regulador de tensión (Proteus)  
Fuente: Autor

El circuito se lo realizó en un protoboard como un prototipo con el fin de obtener la etapa de almacenamiento y conversión de energía el ensamblaje del circuito se puede apreciar en la Figura 30. Se colocó un condensador de 220uF para disminuir el rizado y estabilizar la tensión de salida también se colocó un diodo Zener 1N4007 para que la carga de la batería no regrese al circuito y la corriente solamente fluya en una sola dirección y alimente a la batería.

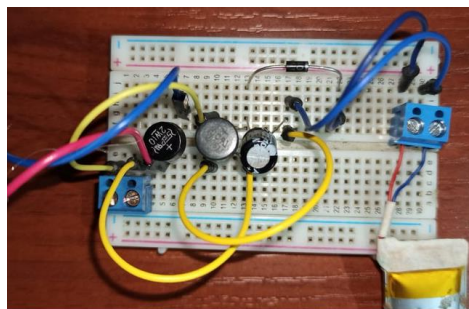


Fig. 30: Circuito de conversión y almacenamiento de energía  
Fuente: Autor

#### 2.6.4 Resultados de generación del prototipo de baldosa piezoeléctrica.

Una vez finalizado el ensamblaje del prototipo de baldosa piezoeléctrica se procedió a realizar las pruebas necesarias tanto de voltaje como corriente a la salida de la etapa de rectificación con el fin de medir estos parámetros antes de alimentar el circuito, se realizó 10 muestras con 3 personas de diferentes pesos (Distinta fuerza aplicada) por cada una se obtuvo 10 medidas las cuales fueron promediadas para tener un valor referencial del voltaje generado. El peso aplicado fue entre 40, 60 y 80Kg aproximadamente en la Tabla 12 se puede observar el peso en N y los valores obtenidos en referencia de los pesos antes mencionados.

TABLA 12.  
VALORES DE GENERACIÓN USANDO LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA

Peso (Kg)	Peso Newtons	Mediciones	Voltaje (V)	Corriente (uA)
<b>40kg</b>	392N	10	20,6V	8,7uA
<b>60kg</b>	588N	10	26,6V	13,1uA
<b>80kg</b>	784N	10	35,46V	17,46uA

Fuente: Autor

El prototipo de baldosa piezoeléctrica muestra que el voltaje generado depende de la fuerza aplicada al sustrato a mayor fuerza mayor deformación y el voltaje incrementa. Se tomó como valor de referencia el voltaje de 26,6V y una corriente de 13,1uA los cuales son generados al aplicar una fuerza de 588N que es el valor de referencia para el modelado.

## 2.7 Modelado del generador piezoeléctrico

Para modelar eléctricamente un dispositivo o material piezoeléctrico es necesario obtener un circuito equivalente. En la Figura 31 se puede ver el equivalente más simple que se puede encontrar en diferentes bibliografías, teniendo en cuenta que las frecuencias en las que se trabajó por lo general son bajas (en ningún caso superior a 20 Hz) el circuito equivalente utilizado consta de una fuente de voltaje (V1) en serie con un capacitor (C1).

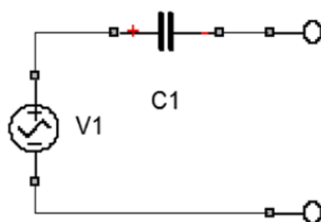


Fig. 31. Circuito Piezoeléctrico equivalente simplificado (Simulink)  
Fuente: (Malmcrona, 2018)

Una vez obtenido el circuito equivalente es necesario calcular a través de fórmulas matemáticas el valor de la fuente de voltaje (V1) que se encuentra en serie con el capacitor (C1). Con los datos técnicos del disco piezoeléctrico encontrados en el Datasheet del fabricante descritos en la Tabla 11 es posible conocer los equivalentes reemplazando los valores en la Ecuación 14 dejando ( $V_{pzt}$ ) en función de la fuerza ( $F$ ) que se le aplique se obteniendo el siguiente resultado.

$$V_{pzt} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,001m}{0,027^2m} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot F$$

$$V_{pzt} = 0,0035 \cdot F$$

Se propone aplicar una fuerza que ejerza una persona con un peso aproximado de 60 kg de forma periódica con intervalos de 0,5 segundos (podría asemejarse con caminar) (Malmcrona, 2018). Para ello se debe calcular cual sería la fuerza ejercida por el individuo.

Según la segunda ley de Newton y sustituyendo con la aceleración de la gravedad y la masa de la persona se puede obtener la fuerza en Newtons luego reemplazamos la F en el resultado de la Ecuación 14 para obtener el valor  $V_{pzt}$ .

$$F = m \cdot a$$

$$F = 60\text{kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cong 588\text{N}$$

Se procedió a reemplazar el valor de la fuerza F en la resultante del  $V_{pzt}$  que está en función de la fuerza obteniendo el voltaje aproximado de un solo disco piezoeléctrico.

$$V_{pzt} = 0,0035 \cdot 588\text{N} = 2,058\text{V}$$

Una vez conocido el  $V_{pzt}$ , es necesario calcular el valor de la capacitancia que se encuentra en serie de esta manera poder obtener un equivalente del circuito eléctrico del disco piezoeléctrico, este valor se puede calcular reemplazando los datos de la ficha del fabricante descritos en la Tabla 11 a través de la Ecuación 15.

$$C_{pzt} = \frac{4}{\pi} \cdot 1850 \cdot 8,854 \times 10^{-12} \cdot \frac{0,027^2}{0,001}$$

$$C_{pzt} = 15,20 \text{ nF}$$

Una vez calculado los equivalentes en la Figura 32 se puede observar que un disco piezoeléctrico del sustrato PZT de 27mm de diámetro por 1mm de espesor al aplicarle una fuerza F de 588 N  $\cong$  60Kg eléctricamente se lo puede representar como una fuente de voltaje ( $V_{pzt}$ ) de 2,058V en serie con un capacitor ( $C_{pzt}$ ) de 15,20 nF.

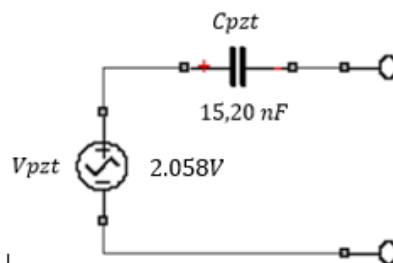


Fig. 32. Circuito Piezoeléctrico valores equivalente (Simulink)  
Fuente: (Malmcrona, 2018)

El prototipo de baldosa piezoeléctrico cuenta con cuatro secciones de 4 discos PZT cada una dando un total de dieciséis discos piezoeléctrico como se puede observar en la Figura 33A esto fue reducido a un equivalente de 4 piezoeléctricos aplicando leyes de los circuitos eléctricos obteniendo los resultados que se puede apreciar en la Figura 33B.

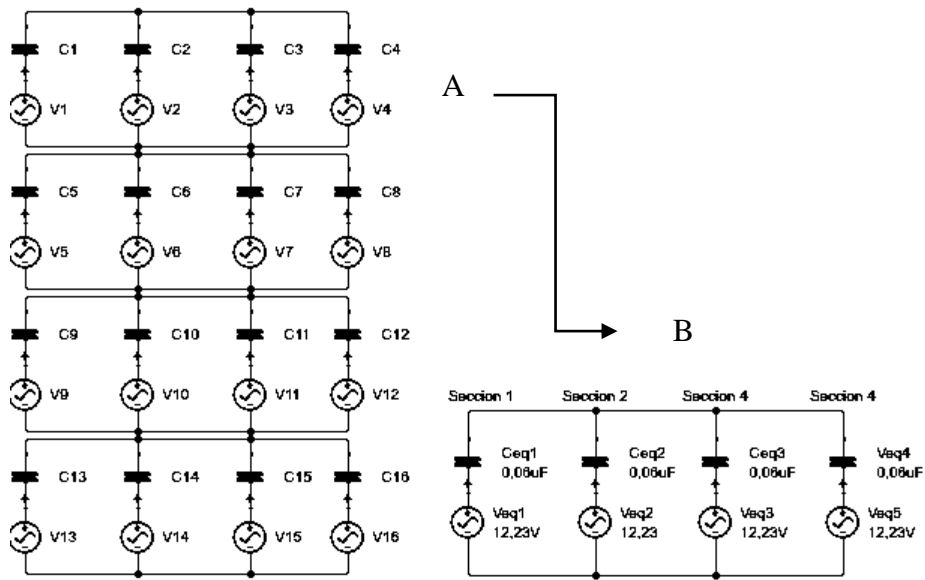


Fig. 33. (A) Discos Titanato zirconato de plomo. (B) Equivalente secciones (Simulink)  
Fuente: Autor

La Ecuación 17 circuito equivalente para dos o más condensadores en paralelo se usó para obtener un equivalente de las 4 capacitancias en paralelo de cada sección y a través de la Ecuación 18 un equivalente de la fuente de tensión de 4 discos piezoeléctricos por sección. Los nuevos valores para un equivalente de 4 discos piezoeléctricos resultaron de ( $V_{eqs}$ ) 8,23V y una capacitancia ( $C_{eqs}$ ) de 0,06uF.

$$C_{eqs} = C1 + C2 + C3 + C4 + \dots + Cn \quad (17)$$

$$C_{eqs} = 15,20 \times 10^{-9} \cdot 4$$

$$C_{eqs} = 0,06 \mu F$$

Cabe mencionar que al ser un sustrato de PZT con una capacitancia externa al conectar los discos piezoeléctricos en serie su fuente de voltaje interno se comporta como una conexión en paralelo y al conectar físicamente los discos piezoeléctricos en paralelo su fuente de voltaje interno actúa como una conexión en serie acumulando el voltaje de los discos conectados entre sí obteniendo un equivalente como se puede observar en la Ecuación 18.

$$V_{eqs} = V1 + V2 + V3 + V4 + \dots + Vn \quad (18)$$

$$V_{eqs} = 2,058V \cdot 4$$

$$V_{eqs} = 8,23V$$

En la Figura 34 se puede observar una simulación de la reducción de 4 piezoeléctricos por sección a 4 piezoeléctricos equivalentes utilizando las propiedades de los circuitos eléctricos se puede observar también la etapa de rectificación la cual alimentará al circuito de carga.

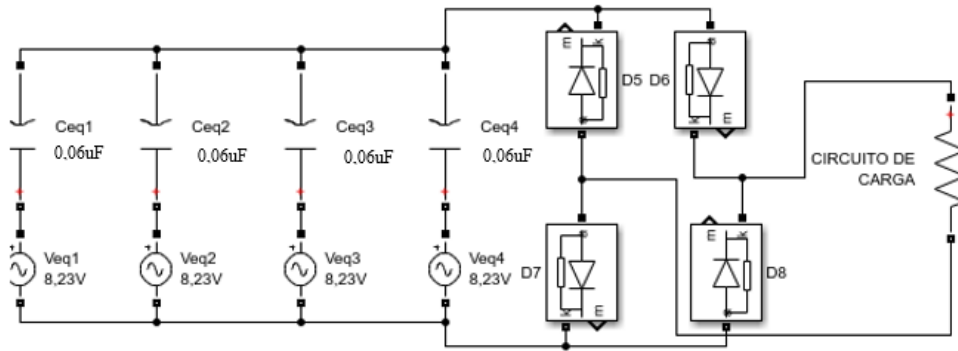


Fig. 34. Equivalente de las 4 secciones de piezoeléctricos (Simulink)  
Fuente: Autor

Para obtener un equivalente total de los 16 piezoeléctricos (Voltaje total de generación del prototipo de baldosa piezoeléctrico) se procedió a realizar un equivalente total de los 4 equivalentes piezoeléctricos usando las Ecuaciones 17 y 18 con esto se logrará obtener una sola fuente de voltaje con un capacitor en serie.

$$C_{Total} = C_{eqs} \cdot 4 = 0,06 \times 10^{-6} \cdot 4 = 0,25 \mu F$$

$$V_{Total} = V_{eqs} \cdot 4 = 8,23V \cdot 4 = 32,92V$$

En la Figura 35A se puede observar el circuito equivalente de la baldosa piezoeléctrica también el voltaje obtenido a la salida de la etapa de rectificación. El voltaje equivalente del prototipo de baldosa piezoeléctrica es de 32,92V con una capacitancia en serie de 0,25uF. La Figura 35B muestra las formas de onda obtenidas antes y después de la etapa de rectificación en el circuito externo de control de carga.

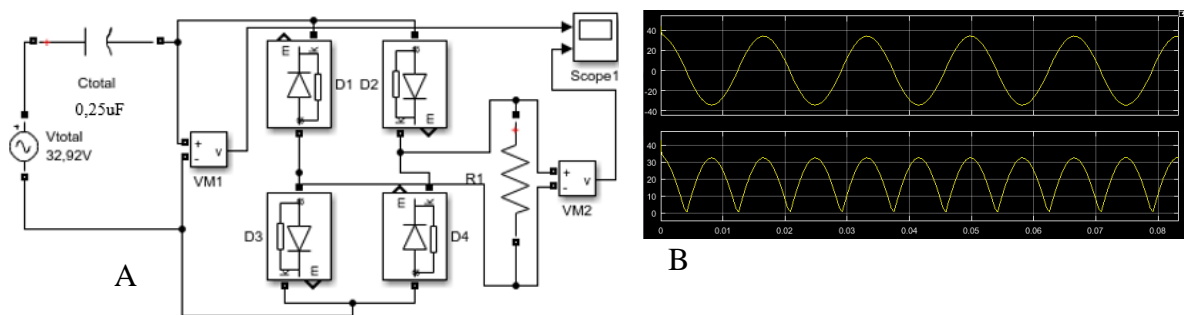


Fig. 35. (A) Circuito equivalente. (B) Formas de Onda por puente rectificador (Simulink)  
Fuente: Autor

### 2.7.1 Resultados del generador piezoeléctrico

En la Tabla 13 se puede observar los resultados obtenidos a través de simulación en comparación con los valores de generación real obtenidos con el modelo físico del prototipo de baldosa piezoeléctrico al aplicarle una fuerza de 588N (60Kg) con una frecuencia aproximada de 5Hz.



TABLA 13.  
RESULTADOS DE GENERACIÓN PIEZOELÉCTRICA OBTENIDOS

Tipo	Peso (N)	Voltaje
Simulación	588N	32.92V
Prototipo	588N	26,6V

Fuente: Autor

Tras realizar repetidas pruebas y promediar valores de voltaje generados por el prototipo de baldosa de PZT el resultado obtenido es un promedio de 26.6V al aplicarle una fuerza de 588N mientras que al realizar el modelado eléctrico y matemático de un disco piezoeléctrico y replicar este modelo para obtener los 16 piezoeléctricos posteriormente se realizó la simulación del circuito usando el software Proteus 8 Profesional y al medir la salida de voltaje usando la herramienta DC Voltmeter se obtiene un voltaje de salida de 32.92V los valores mencionados anteriormente son valores tomados a la salida de la baldosa piezoeléctrica sin ninguna conexión a circuitos externos.

Como se puede apreciar existe una diferencia entre el voltaje real generado por el prototipo de baldosa piezoeléctrico y la simulación realizada, esto puede ser ocasionado por perdidas en el cableado también se debe a que el simulador Proteus 8 Profesional al ser un software informático toma valores totales, es decir, asume que cada pisada de 588N es simétrica para cada uno de los 16 piezoeléctricos, sin embargo, en el prototipo real la gradiente de cada pisada es diferente y no es simétrico para cada piezoeléctrico la fuerza se concentra en diferentes puntos provocando que el voltaje generado por cada disco piezoeléctrico no sea igual en todos los casos.

Cabe también mencionar que estos discos piezoeléctricos de PZT con un grosor de 1mm tienen un límite de fuerza aplicada y voltaje máximo de generación las características del dispositivo reflejan un máximo de generación entre 2.5 a 3V al aplicarle un peso máximo entre 75 y 80 Kg si el peso excede estos límites el material piezoeléctrico impregnado en los discos podría romperse es por eso que para una aplicación mayor es necesario usar discos más sólidos de mayor dimensión y resistencia dependiendo de la aplicación para la cual se los vaya a utilizar.

## **2.8 Modelado del nanogenerador piezoeléctrico**

El desarrollo de un generador piezoeléctrico a nivel nano crea una estrecha relación entre la superficie de un material con respecto a su volumen mientras el material tenga divisiones más pequeñas mayor va a ser su área superficial. Para poder entender mejor esta relación en la Figura 36 y la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos al calcular el área superficial según el número de divisiones realizadas a un cuerpo sólido.

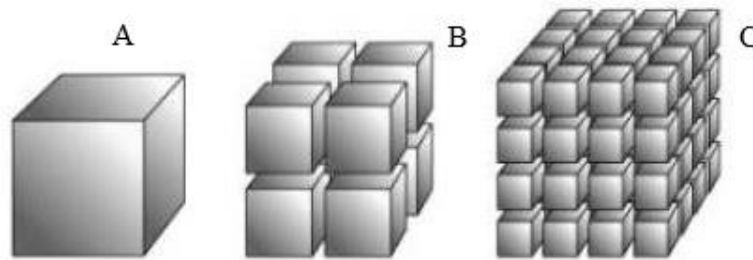


Fig. 36: Relación Superficie – Volumen  
Fuente: (González, 2020)

La relación de volumen con respecto a la superficie se puede representar con dos fórmulas matemáticas muy sencillas las cuales se pueden apreciar en las Ecuaciones 19 y 20 (González, 2020) con las cuales es posible determinar el área superficial por volumen de un material.

$$V = L^3 \quad (19)$$

$$S = 2(ab + bc + ac) \quad (20)$$

Donde

$V$ : es el volumen ( $m^3$ )

$L$ : es el valor de los lados (m)

$S$ : es la superficie del material ( $m^2$ )

$a$ : es la altura (m)

$b$ : es la longitud (m)

$c$ : es el ancho (m).

Se calculó el área superficial que se obtiene al dividir el material en partes más pequeñas conservando el mismo volumen los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 14.

TABLA 14.  
RESULTADOS DE LA SUPERFICIE CON RESPECTO AL VOLUMEN DE UN CUERPO

	1 cubo 4cm (A)	8 cubos de 2cm (B)	64 cubos de 1cm (C)
<b>Superficie <math>cm^2</math></b>	96	192	384
<b>Volumen <math>cm^3</math></b>	64	64	64
<b>Superficie/Volumen</b>	1,5:1	3:1	6:1

Fuente: Autor

Se demuestra que entre más divisiones tiene el material el área superficial es mayor en la Tabla 14 se puede apreciar que la superficie de un cubo de 4cm es de  $96\text{ cm}^2$ , el cubo de 4cm puede dividirse en 8 cubos de 2cm y en 64 cubos de 1cm y los resultados son de  $192\text{ cm}^2$  y  $384\text{ cm}^2$  de superficie respectivamente. Pero al realizar el cálculo de su volumen en los tres casos se obtuvo el mismo volumen de  $64\text{ cm}^3$  ya que este valor no varía.

Es por eso que el desarrollo de un generador piezoeléctrico a nivel nano es más óptimo que uno a escala normal, con esto se demostró que mientras mayor área superficial tenga un material mayor va a ser la generación. En el caso de la baldosa piezoeléctrica si se usaría nanomateriales esta sería más eficiente ya que se podría colocar mayor cantidad de material piezoeléctrico en la misma área de la baldosa.

### 2.8.1 Generación vs nanogeneración piezoeléctrica

Para referenciar este cambio de escalas el valor de voltaje a generar por un nanogenerador es posible determinarlo a través de la Ecuación 21 donde se haya tomado en cuenta el factor de miniaturización de los elementos sin afectar a las propiedades del sustrato. El potencial piezoeléctrico máximo puede ser calculado como se detalla a continuación (Kumar & Kim, 2011).

$$V_{max} = \frac{F \cdot g_{33} \cdot L}{A} \quad (21)$$

Donde

$F$ : es la fuerza aplicada al piezoeléctrico

$g_{33}$ : es el coeficiente de voltaje piezoeléctrico

$L$ : es la longitud del Piezo eléctrico

$A$ : es el área de contacto.

El potencial generado debe ser suficiente para impulsar los electrones inducidos por el piezoeléctrico a través de un circuito externo. Por lo tanto, un nanogenerador piezoeléctrico de PZT de 500um de diámetro genera un voltaje aproximado de 1.63V (Kumar & Kim, 2011). Como se puede apreciar en Tabla 15 se realiza una comparativa de las características de los dos dispositivos a diferentes escalas.

TABLA 15.  
COMPARACIÓN DE GENERADORES ESCALA NANO VS ESCALA NORMAL

Discos	Dimensión (m)	Voltaje	Área de contacto (m)
PZT normal	0,027	2,5V	0,02
PZT nano	500x10 <sup>-6</sup>	1,63V	500x10 <sup>-6</sup>

Fuente: Autor

Entonces para conocer el número de discos piezoeléctricos a escala nano que reemplazarían un disco a escala normal de 27mm se procedió a realizar la siguiente analogía matemática.

$$NumDiscosNano = \frac{Dimencion Escala normal}{Dimencion Escala nano} = \frac{0,02m}{500x10^{-6}m} = 40$$

El  $NumDiscosNano$  equivale al número de nanogeneradores que reemplazan un generador a escala normal en el caso de este trabajo un disco piezoeléctrico de sustrato PZT de 27mm se sustituye con 40 nanogeneradores para determinar el voltaje generado por esta cantidad de nanogeneradores se tomó el valor referencial de 1,63V (Kumar & Kim, 2011) y cómo se puede observar en los cálculos presentados a continuación el resultado muestra una generación aproximada de 65,2V.

$$V_{Nanogenerador} = 40 * 1,63$$

$$V_{Nanogenerador} = 65,2V$$

## 2.8.2 Resultados del nanogenerador piezoeléctrico

Para calcular el potencial o voltaje máximo y verificar los resultados que se puede obtener con uno o varios nanogeneradores se procedió a calcular este voltaje usando la Ecuación 21 la cual anula el factor de miniaturización. Para poder reemplazar los valores en la ecuación mencionada anteriormente es necesario calcular varios parámetros detallados a continuación.

TABLA 16.  
COMPROBACION DEL VOLTAJE DE UN NANOGENERADOR

$F = 588 N \cong 60Kg$	
$g_{33} = 2x10^{-3} \frac{Vm}{N}$	$V_{max} = \frac{F \cdot g_{33} \cdot L}{A}$
$d = 2,7 cm$	$V_{max} = \frac{588 \cdot 2x10^{-3} \cdot 8,48}{5,73}$
$r = \frac{d}{2} = \frac{2,7cm}{2} = 1,35cm$	$V_{max} = 1,74V$
$L = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 1,35cm = 8,48 cm$	
$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 1,35^2 cm = 5,73 cm^2$	

Fuente: Autor

Con los resultados obtenidos y detallados en la Tabla 16 se puede observar que si llevamos a la miniaturización los dispositivos PZT con las características y propiedades actuales a través de un nanogenerador el voltaje obtenido usando la ecuación de miniaturización es de 1,74V al aplicarle una fuerza aproximada de 588N.

# CAPÍTULO 3

## Simulación y análisis de resultados

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante el estudio de los nanogeneradores TENG y PENG, también se detalla la descripción de los diferentes softwares usados en el presente trabajo, los análisis están enfocados en la construcción del prototipo de baldosa piezoeléctrico y su circuito de control de carga, simulaciones, cálculos eléctricos y matemáticos aplicados al modelamiento. Usando el software NI LabVIEW se realizó la programación del generador y nanogenerador a través de un formulario que facilita el ingreso de valores de entrada de las diferentes propiedades de discos con sustrato PZT obteniendo los resultados de generación automáticamente y mostrándolos a través de una interfaz amigable con el usuario.

### 3.1 Software para el desarrollo de simulaciones

Para la verificación de los resultados obtenidos a través de los modelos matemáticos y eléctricos es necesario avalar la información obtenida a través de la realización de simulaciones y programación usando diferentes software para ingeniería los cuales en su gran mayoría cuentan con una versión estudiantil, sin embargo, existen otros softwares de mayor alcance y desarrollo como es el caso de NI LabVIEW que es un software con licencia de uso, para este trabajo es necesario usar este tipo de software ya que se propone el desarrollo de una aplicación para modelar gráficamente y realizar el cálculo automático de generación eléctrica usando dispositivos piezoeléctricos de sustrato PZT en un área determinada a través de una pantalla dinámica y amigable con el usuario final.

#### ➤ LabVIEW

LabVIEW es una plataforma de programación gráfica que ayuda a visualizar cada aspecto de las diferentes simulaciones o proyectos realizados, incluye: configuración de hardware, datos de medida y depuración, simplifica la lógica compleja en diagramas, desarrolla algoritmos de análisis de datos y ayuda a diseñar interfaces de usuario personalizadas para proyectos de ingeniería (CORP, 2021).

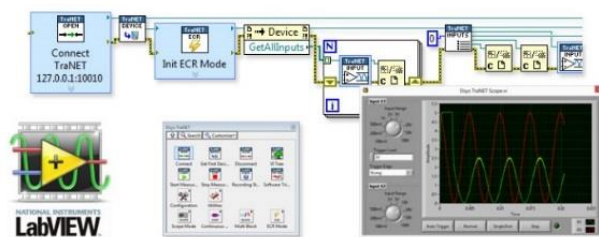


Fig. 37: Entorno de desarrollo NI LabVIEW  
Fuente: (CORP, 2021)

Con la ayuda de este software se realizó la representación gráfica y programación del generador y nanogenerador piezoeléctrico con el fin de llevar el modelo matemático y modelo eléctrico a una pantalla gráfica de esta manera el usuario pueda manipular e ingresar diferentes valores de las propiedades de diferentes modelos de discos de sustrato PZT y también para que el usuario pueda apreciar gráficamente los resultados de generación piezoeléctrica obtenidos al momento de variar los valores y características de estos elementos.

### 3.2 Programación del generador piezoeléctrico en LabVIEW

En la Figura 38 se puede observar el resultado de la programación del generador piezoeléctrico a través de las Ecuaciones 14 y 15 descritas en el capítulo anterior. El detalle de la codificación gráfica se puede observar en el apartado del Anexo B. Los diferentes campos de texto permiten ingresar los valores de cada variable de las ecuaciones que relacionan este sistema y también configurar las características y propiedades de los discos piezoeléctricos de PZT, después de ingresar los valores en el formulario el cálculo se realiza internamente a través de la programación de los terminales de conexión con los cuales se identifica cada campo. En esta pantalla se puede observar el valor de la fuente de voltaje PZT y la capacitancia PZT en serie de este modelo que representa eléctricamente un disco piezoeléctrico del sustrato antes mencionado.

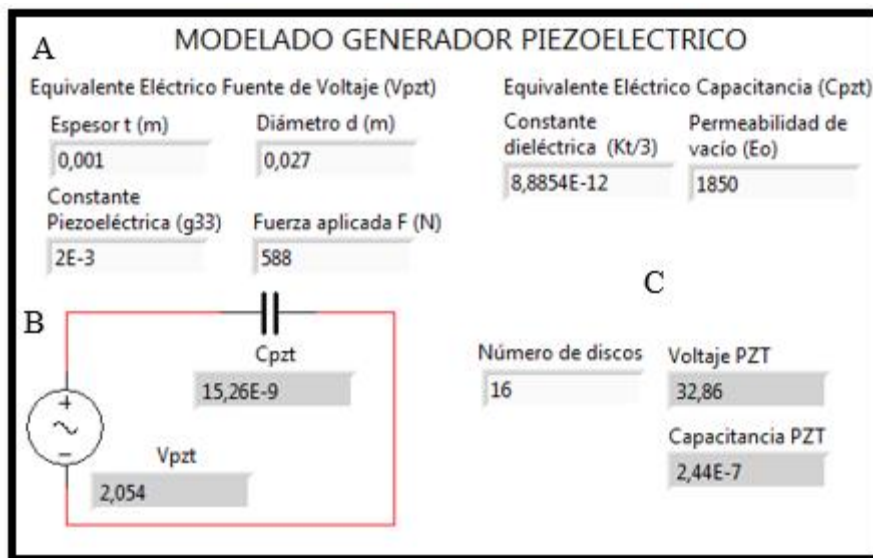


Fig. 38. Formulario de ingreso y visualización de resultados del generador piezoeléctrico.  
Fuente: Autor

En la sección A de la Figura 38 se insertó los campos de texto para poder ingresar las propiedades del disco piezoeléctrico de sustrato PZT también un campo que relaciona la fuerza aplicada (F) con el voltaje generado por cada disco piezoeléctrico en este caso la simulación se realizó con una fuerza aplicada de 588N. Los valores de estos campos de texto

pueden ser modificados de acuerdo a las dimensiones y propiedades de diferentes modelos de discos piezoeléctricos y así conocer el voltaje aproximado de generación que estos pueden proporcionar. El circuito equivalente de un disco piezoeléctrico de sustrato PZT puede ser representado con su modelo eléctrico más básico como una fuente de voltaje en serie con un capacitor, en la sección B de la Figura 38 se insertó un gráfico que hace referencia a este equivalente con los valores de  $V_{PZT}$  y  $C_{PZT}$  respectivamente obtenidos al configurar los valores de las propiedades del disco piezoeléctrico de sustrato PZT en el formulario. El prototipo de baldosa piezoeléctrico desarrollado para este trabajo cuenta con 16 discos piezoeléctricos es por eso que en la sección C de la Figura 38 se insertó un campo para poder controlar el número de discos a usar en la simulación, el modelado ayuda a conocer el valor de generación de un solo disco piezoeléctrico en caso de ser necesario calcular el valor de voltaje generado por un mayor o menor número de discos piezoeléctricos de sustrato PZT es necesario configurar este valor en el campo “Número de discos” del formulario.

➤ **Flujograma de cálculo para el modelado del generador piezoeléctrico**

Las ecuaciones 14 y 15 se modelaron a través de un diagrama de flujo para poder entender el proceso de programación como se puede observar en la Figura 39. En la sección a y b se pueden apreciar los bloques de inicio, a continuación, los bloques para el ingreso de la declaración de variables por consiguiente los bloques para los cálculos que se realizan dentro de la ecuación, para demostrar el flujo de una manera más clara se organizó en dos bloques determinando los cálculos por partes y finalmente el bloque para mostrar el valor calculado en las variables  $V_{pzt}$  y  $C_{pzt}$  por último el bloque de fin del flujograma.

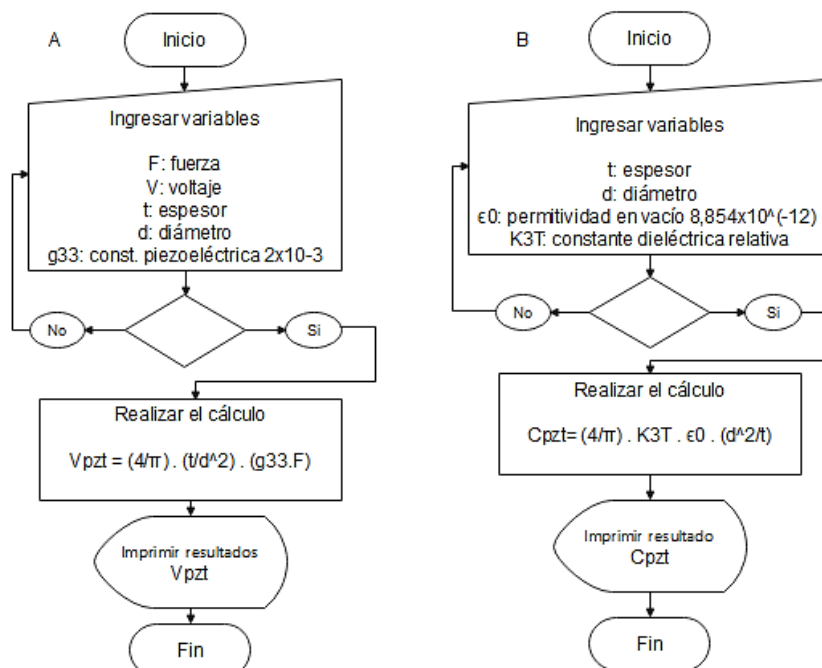


Fig. 39. (A)Flujograma Voltaje, (B) Flujograma capacitancia  
Fuente: Autor

### 3.3 Programación del nanogenerador piezoeléctrico en LabVIEW

Conociendo los valores de generación a través de discos piezoeléctricos de sustrato PZT de 27mm se llevó estos valores a escalas nanométricas usando la Ecuación 21 planteada en el Capítulo 2 de esta manera se determinó los valores de generación en el caso de un nanogenerador piezoeléctrico. En la Figura 40 se puede apreciar los valores de generación obtenidos entre el prototipo de baldosa piezoeléctrica con 1 y 16 discos de PZT, adjunto también en la misma pantalla de desarrollo el cálculo de nanogeneración tomando en cuenta el área superficial. El detalle de la codificación gráfica para obtener el resultado de esta interfaz se puede observar en el apartado del Anexo B.

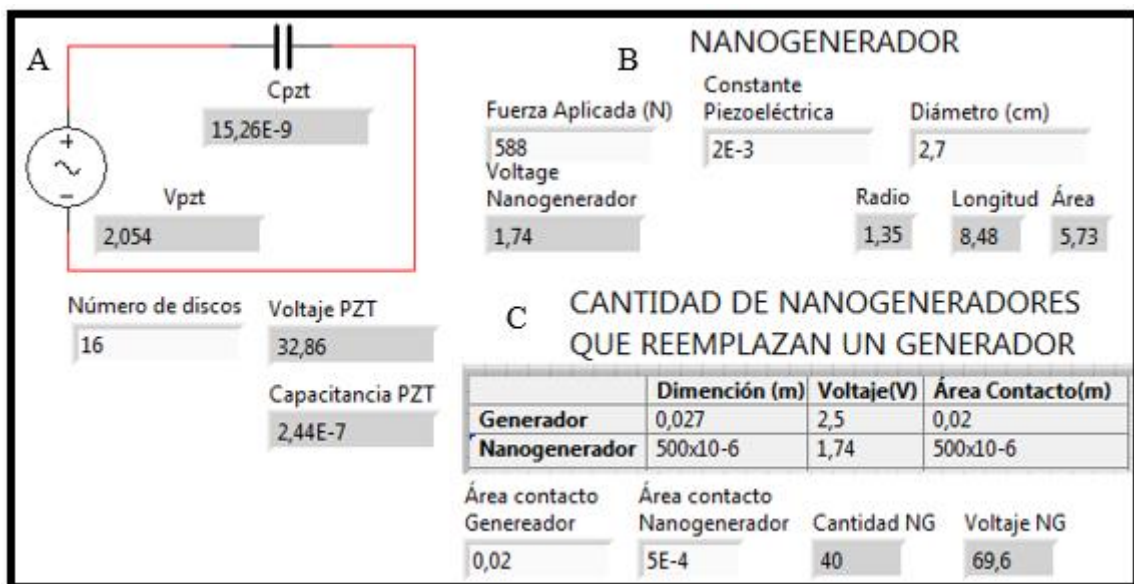


Fig. 40. Modelamiento del nanogenerador en base a datos del generador piezoeléctrico  
Fuente: Autor

La sección A de la Figura 40 muestra el equivalente de generación de 16 discos piezoeléctricos de sustrato PZT con un resultado de generación de 32V por  $900\text{cm}^2$  aproximadamente, cada disco cuenta con un área de contacto de  $25\text{mm}^2$ . En la sección B de la Figura 40 se puede observar el valor de voltaje de un nanogenerador piezoeléctrico al aplicar la Formula 21 que relaciona el área superficial y toma en cuenta la miniaturización del materia a este se le aplicó una fuerza de 588N y el resultado de generación fue de 1,74V también se puede observar en la sección C de la Figura 40 el equivalente numérico de nanogeneradores que reemplazarían el área que ocupa un solo disco generador piezoeléctrico logrando así optimizar la generación a 69V aproximadamente si se reemplaza un solo generador por nanogeneradores. En el Anexo B se puede observar la programación por diagrama de bloques.



### ➤ Flujograma del cálculo del modelado para el nanogenerador piezoeléctrico

El flujograma que se puede apreciar en la figura 41 muestra el funcionamiento de la programación de la ecuación 21 la cual determina el  $V_{max}$  de un nanogenerador piezoeléctrico de sustrato PZT, el diagrama de flujo muestra el bloque de inicio, un bloque para el ingreso de las variables que relaciona la ecuación a continuación se insertó un bloque de decisión ya que la longitud tiene que ser ingresada de manera obligatoria, si la longitud es menor a cero se solicitará ingresar el valor correcto, caso contrario, continuará al bloque para calcular los parámetros necesario que interrelacionen la fórmula para el cálculo de  $V_{max}$ , una vez que se obtuvieron los valores de las variables se realizó el cálculo y se muestra el resultado en el bloque  $V_{max}$  cerrando así el flujo.

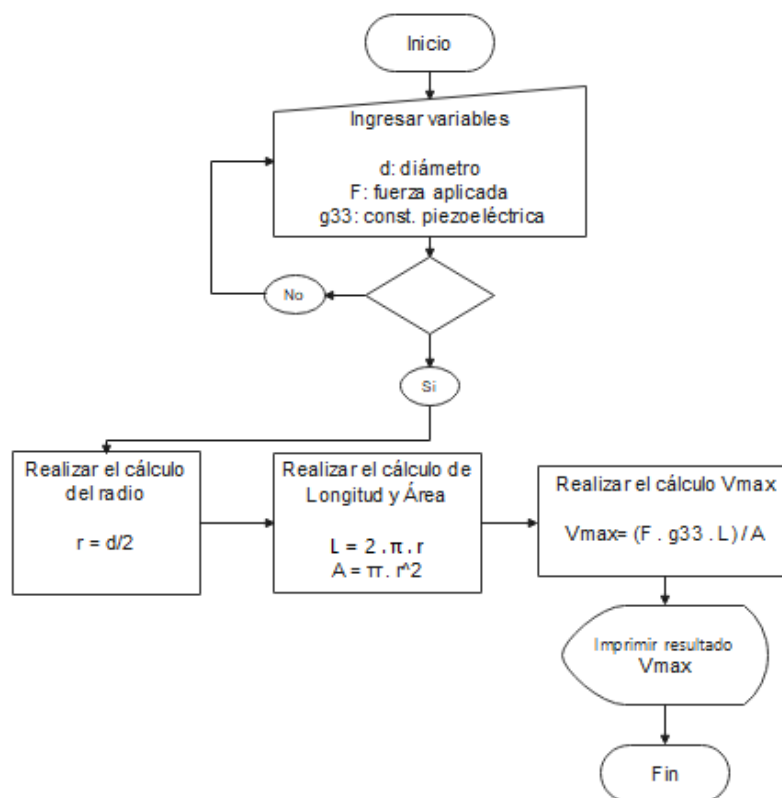


Fig. 41. Flujograma para el cálculo de generación del nanogenerador  
Fuente: Autor

### 3.4 Análisis de resultados

Se realizó el análisis de resultados obtenidos del generador realizado con el prototipo de baldosa piezoeléctrica que usa 16 discos piezoeléctricos de 27mm de sustrato PZT y un nanogenerador a nano escala de  $500\mu m$  el análisis toma en cuenta los parámetros de generación y correcciones realizados tanto en el prototipo de baldosa PZT como en el cálculo para obtener los valores de generación del nanogenerador. También se analiza la optimización generada al reemplazar nanogeneradores por un disco de generación piezoeléctrica de sustrato PZT usando la misma área.

### 3.4.1 Prototipo de baldosa piezoeléctrica

Para obtener resultados más exactos a través de cálculos matemáticos y eléctricos se obtuvo un equivalente de los 16 discos piezoeléctricos de PZT a un solo circuito equivalente compuesto por una sola fuente de voltaje en serie con una capacitancia con lo cual se realizó una simulación en el software Proteus de esta manera conocer el voltaje generado por toda la baldosa asumiendo un solo generador piezoeléctrico general. El voltaje generado al ejercer una fuerza de 588N es de aproximadamente 33V en CA ya que el voltaje generado es por pulsos simulando una onda sinusoidal, la simulación fue realizada con la configuración a 5Hz de frecuencia como se puede apreciar en la Figura 42 sección A. Se asume que el voltaje alterno va a ser constante pero el comportamiento varía dependiendo de la fuerza aplicada en la baldosa piezoeléctrica y a la gradiente de cada pisada que no va a ser igual tanto para los discos piezoeléctricos como para cada sección del prototipo de baldosa, este comportamiento se puede apreciar en la Figura 42 sección B.

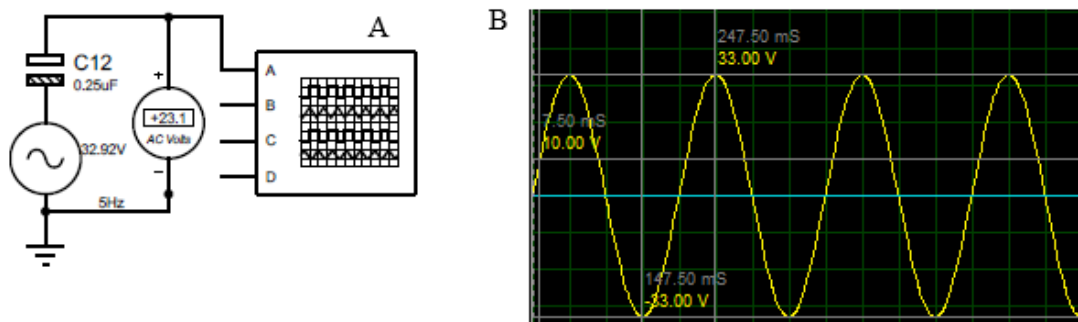


Fig. 42. (A) Equivalente piezoeléctrico, (B) Forma de onda alternas (Proteus)  
Fuente: Autor

La baldosa piezoeléctrica entrega un voltaje no constante y en forma de picos por lo cual no es conveniente conectar una carga directamente a la salida del circuito conformado por el paralelo de los discos, en el caso de este trabajo se cargó una batería de li-ion de 350mA. Para poder lograr este propósito en la Figura 43 sección A se puede observar la implementación del circuito básico de control de voltaje usando un puente rectificador de onda completa para rectificar el voltaje y evitar pérdidas como se puede apreciar en la Figura 43 sección B en los resultados obtenidos el voltaje disminuyó a 32.25V.

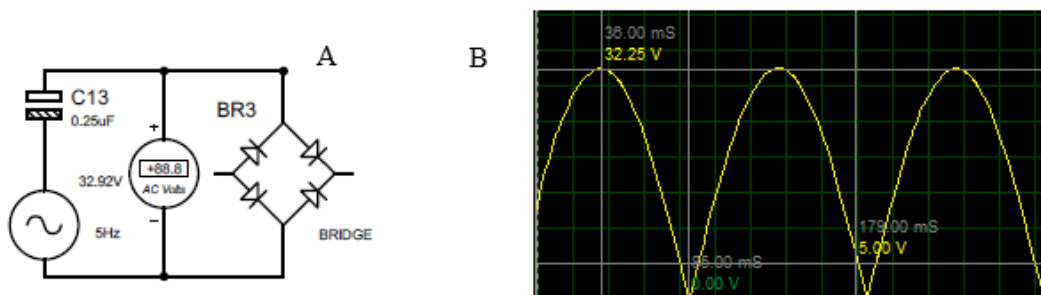


Fig. 43. (A) Rectificador de onda completa, (B) Voltaje etapa de rectificación (Proteus)  
Fuente: Autor

Para estabilizar el voltaje para la conexión de la carga se colocó un capacitor como filtro, en la Figura 44 sección A se puede observar que al usar como filtro un capacitor de  $220\mu F$  el voltaje de rizado fue de 8V aproximadamente con un voltaje máximo de 28V. Para disminuir el voltaje de rizado se redimensionó el capacitor a través de fórmulas para circuitos eléctricos como se detalla en el Anexo A, al reducir el voltaje de rizado se logra tener un voltaje más estable determinando un valor de  $470\mu F$  que es un valor comercial. En la Figura 44 sección B se puede apreciar la reducción del voltaje de rizado a 4V aproximadamente y un voltaje máximo de 28V logrando un voltaje más estable también se colocó un diodo 1N4007 en serie al capacitor para conducir la corriente en una sola dirección y la batería de  $350mA$  pueda ser cargada, el diodo seleccionado es de 1A debido a que el circuito con la carga de  $350mA$  en ningún momento sobrepasara este límite y así también se logrará evitar que la batería se descargue.

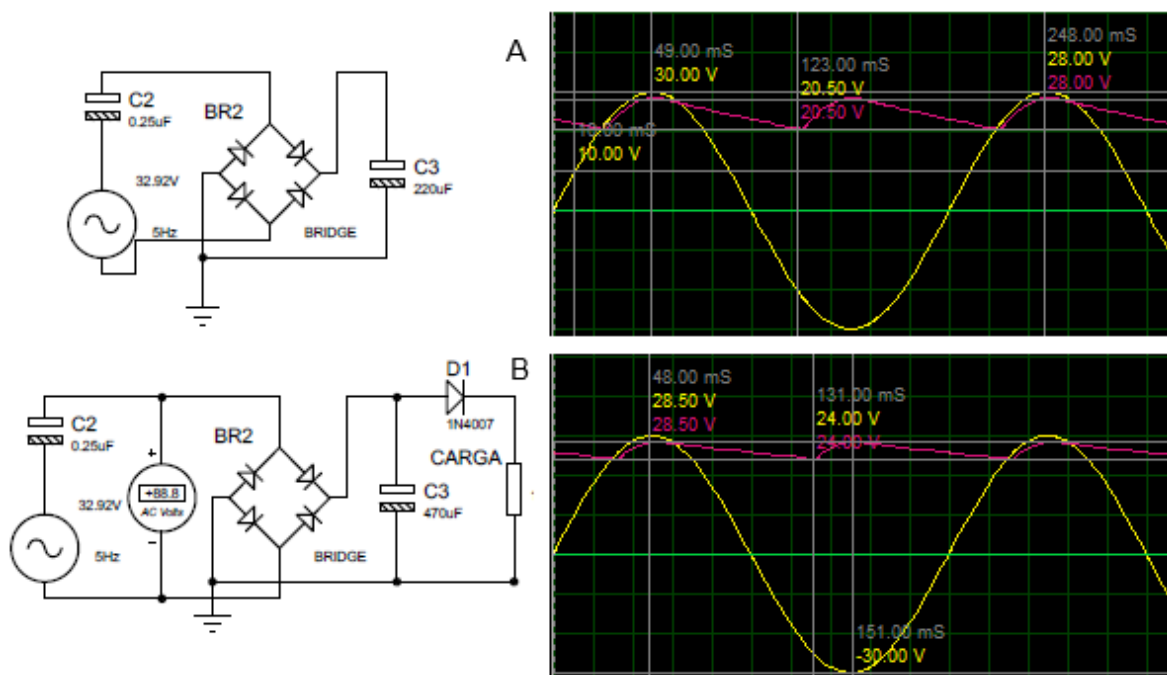


Fig. 44. (A) Voltaje de rizado con  $220\mu F$ . (B) Voltaje de rizado con  $470\mu F$ .  
Fuente: Autor

Después de realizar pruebas simultaneas tanto en simulaciones como con diferentes fuerzas aplicadas al prototipo de baldosa piezoeléctrica de sustrato PZT se determinó que la batería se cargaría completamente en aproximadamente 2h ya que la corriente puede llegar a ser de hasta  $13,1\mu A$ . Cabe mencionar que los valores pueden variar dependiendo de la fuerza, tiempo de exposición y continuidad con la que se aplique la fuerza sobre la superficie del prototipo de baldosa piezoeléctrica. Las pruebas se realizaron con una frecuencia de 5Hz aproximadamente que simula el caminar de una persona con lo cual se logra cargar la batería a 0,01V en 20s. Por lo cual se puede determinar el tiempo de carga como se detalla a continuación.

$$T_{carga\ 1V} = \frac{20s \cdot 1V}{0,01V} = 2000s \cong 33min$$

$$T_{carga\ 3,7V} = 33min * 3,7V \cong 2h$$

Se realizó el cálculo para un 1V dando como resultado para ese voltaje un tiempo de exposición de 33min a partir de esa analogía se calculó el tiempo para llegar a 3,7V que es el voltaje de la batería dando un tiempo de exposición de 2h dependiendo de varios factores mencionados anteriormente.

### 3.4.2 Nanogenerador piezoeléctrico

El estudio del desarrollo de un nanogenerador de sustrato PZT por síntesis de electrospinning process con un área de contacto de  $500\mu m$  muestra como resultado 1,63V aproximadamente, realizando un análisis con respecto al generador piezoeléctrico modelado eléctrica y matemáticamente en este trabajo se evidenció la optimización de llevar un generador normal a un nanogenerador. Como se puede apreciar en la Figura 45 se realizó la reducción teórica y matemática de 40 nanogeneradores y se realizó también una simulación usando el software Proteus el voltaje obtenido es de 65V aproximadamente.

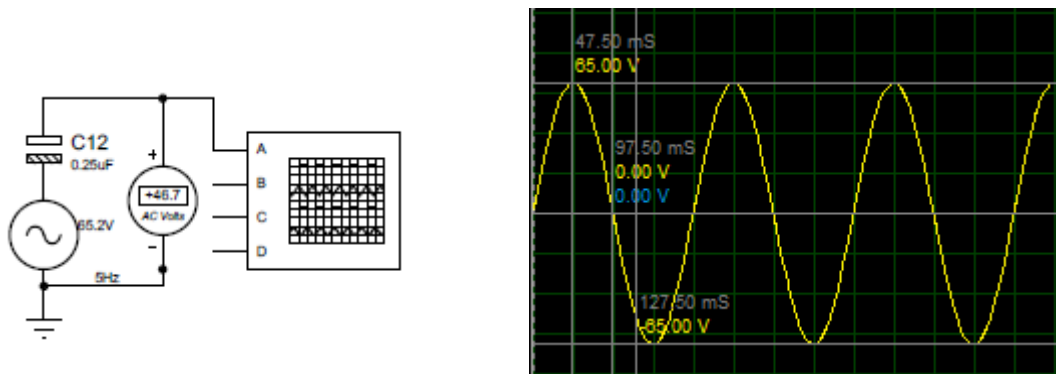


Fig. 45. Simulación de un nanogenerador  
Fuente: Autor

Los resultados obtenidos y cálculos realizados muestran que 40 nanogeneradores reemplazarían un disco piezoeléctrico PZT de 27mm con el cual se desarrolló el prototipo de baldosa piezoeléctrica en este trabajo por lo cual se determina que es óptimo colocar 40 nanogeneradores que generan un aproximado de 65V en área de 27mm en lugar de colocar 16 generadores piezoeléctricos que cada uno ocupa un área de 27mm en un área total de  $900cm^2$  generando 32V aproximadamente.

## Conclusiones

- En este trabajo se analizaron los diferentes tipos de sustratos como PZT y PDMS los cuales cuentan con propiedades de generación eléctrica, estos materiales dan respuesta a ciertos efectos como son el tribo y piezoeléctrico siendo usados como generadores para energy harvesting. Se logró evidenciar una mayor eficiencia al usar sustratos a través del efecto triboeléctrico con un 60% mientras que al aplicar el efecto piezoeléctrico se logra aprovechar un 50% de eficiencia de conversión de energía eléctrica. Sin embargo, las aplicaciones para nanogeneradores triboeléctricos están basados en estudios desarrollados en laboratorio con sustratos dopados para una mayor eficiencia mientras que existen aplicaciones reales desarrolladas bajo el efecto piezoeléctrico demostradas a través de baldosas, suela de zapatos y discos cerámicos para carreteras en el caso de generadores y sensores, transductores u otros dispositivos electrónicos en el caso de nanogeneradores piezoeléctricos.
- Existen varias formas para determinar un modelo que represente un nanogenerador tribo o piezoeléctrico a través del modelado eléctrico de un generador se logró determinar el voltaje generado en relación con la fuerza aplicada y con el desarrollo de un prototipo de baldosa piezoeléctrica con sustrato PZT se determinó valores referenciales aproximados de 32V a partir de 16 dispositivos de 27mm de diámetro y una constante de tensión piezoeléctrica  $g_{33}$  de  $2 \times 10^{-3} \frac{Vm}{N}$  cada uno, extrapolando los mismos datos a nano escala tomando como única consideración el escalamiento y el área superficial se estima una generación de 65V con las dimensiones de un solo disco generador PZT usado en el prototipo desarrollado demostrando así una mayor eficiencia con el desarrollo de nanogeneradores.
- El desarrollo de la aplicación en LabVIEW permite determinar los valores de generación eléctrica automáticamente de esta manera verificar los resultados obtenidos del modelamiento del sistema piezoeléctrico realizado en este trabajo y los valores aproximados que se obtendrían al implementar generadores o nanogeneradores en un área determinada. El desarrollo del aplicativo cuenta con una pantalla amigable con el usuario y de manera gráfica y representativa se pueda interpretar y modificar los datos y resultados obtenidos de una manera más didáctica.

## Recomendaciones

- Es necesario realizar un estudio más minucioso acerca de los nanogeneradores TENG y PENG su desarrollo y campos de aplicación así como la investigación de los diversos materiales que poseen el efecto tribo o piezoeléctrico para proceder a su análisis y proponer el diseño de nanogeneradores que puedan ser probados mediante simulación verificando su eficiencia, si bien es cierto el desarrollo de los nanogeneradores está enfocado para la alimentación de dispositivos pequeños como actuadores, sensores, transductores incluso para la autoalimentación de implantes médicos a través de estímulos o movimientos corporales se espera que este trabajo sirva de base para futuros estudios y desarrollo de esta tecnología.
- De acuerdo con los resultados bibliográficos obtenidos en este trabajo se pudo evidenciar la de análisis y estudios de varios sustratos como (VDF-HFP) Nano fibras, BaTiO<sub>3</sub>, GaN tanto para generadores como nanogeneradores triboeléctricos por lo cual es necesario realizar una investigación más a fondo acerca de los modos de uso del efecto triboeléctrico, este trabajo puede servir de base para en un futuro empezar a investigar a profundidad de este efecto con sus respectivos sustratos y así lograr aplicaciones reales fuera de laboratorios que logren la generación de energía limpia y renovable de la misma manera como se está aprovechando el efecto piezoeléctrico a través de sustratos PZT.
- Debido a la situación de emergencia en la que se encuentra actualmente el país no fue posible probar el prototipo de baldosa piezoeléctrica en zonas de alto tráfico con alta afluencia de personas es por eso que se recomienda desarrollar un prototipo con discos de sustrato PZT con mayores dimensiones y en un futuro validar este modelo e integrarlo en un área mayor con alto tráfico y a través de un estudio técnico económico determinar la potencia generada por estos dispositivos los beneficios y la posibilidad de aprovechar esta generación para suplir la demanda eléctrica inyectando la energía generada a la red eléctrica.

## Referencias

- Zhang, R., Hummelgård, M., Örtengren, J., Olsen, M., Andersson, H., & Olin, H. (2018). *Interaction of the human body with triboelectric nanogenerators*. Sweden Holmgatan: Nano Energy.
- Arévalo Lizardo, L., & Lamprea Beltrán, D. (2019). Diagnóstico para la implementación de baldosas piezoeléctricas como alternativa de energía renovable en la Universidad Santo Tomás Villavicencio Campus Aguas Claras. *Tesis (Trabajo de Grado)*. Universidad Santo Tomás, Villavicencio. Obtenido de <https://n9.cl/t0c6a>
- Askari, H., Khajepour, A., Khamesee, M. B., & Wang, Z. L. (2018). Piezoelectric and triboelectric nanogenerators: Trends and impacts. *Nano Today*, 22, 3-5. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2018.08.001>
- Bera, B. (2016). Recent Advances In Piezoelectric Nano generators In Energy Harvesting Applications. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 2(7), 4-5. Obtenido de <https://n9.cl/kyz4>
- Chang, W. Y., & Yang, C. H. (2013). Energy Harvesting Simulation of Piezoelectric ZnO for Electromechanical Nanogenerators. *Advances in Energy Engineering (AEE)*, 1, 102.
- Chicana, W., & Sastré, J. (2016). La viabilidad de la nanoenergía. *Revista Energías Renovables*, 4(29), 8-10. Obtenido de [https://www.anes.org/cms/contenido/docs/revista/RER\\_29.pdf](https://www.anes.org/cms/contenido/docs/revista/RER_29.pdf)
- CORP, N. I. (27 de 01 de 2021). *Engineer Ambitiously*. Obtenido de Engineer Ambitiously: <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>
- Cui, X., Zhang, Y., Hu, G., & Zhang, Y. (2020). Dynamical charge transfer model for high surface charge density triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 70, 6-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104513>
- Dharmasena, G., & Silva, P. (2019). Towards optimized triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 62, 3-5. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.057>.
- Fan, F., Tang, W., & Wang, Z. L. (2016). Flexible Nanogenerators for Energy Harvesting and Self-Powered Electronics. *Advanced Materials*, 28(22), 18-19. doi:10.1002/adma.201504299
- Gómez Martínez, A. (31 de 10 de 2017). Materiales Piezoeléctricos: La nueva fuente mundial de energía renovable. *Tesis de (Ingeniería)*. Universidad del Magdalena, Magdalena. Obtenido de <https://n9.cl/ged7>
- González, C. (01 de 01 de 2020). *La célula*. Obtenido de La célula: <https://botanica.cnba.uba.ar/Pakete/3er/LaCelula/LaCelula.htm>
- Gutierrez, J. A. (2013). Baldosa Piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético. *Trabajo de Grado*. Escuela de Ingeniería de Antioquia., Antioquia., Colombia. Recuperado el 01 de 04 de 2020
- Han, S., Lee, J., Lin, J., & Ho, J. (2019). Piezo/triboelectric nanogenerators based on 2-dimensional layeredstructure materials. *Nano Energy*, 57(12), 2. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.12.081>.

- He, W., Qian, Y., Rasheed, A., & Kang, D. J. (2018). Ultrahigh Output Piezoelectric and Triboelectric Hybrid Nanogenerators Based on ZnO Nanoflakes/Polydimethylsiloxane Composite Films. *ACS Publications*, 1(1), 6-7. doi:10.1021/acsami.8b15410
- Hu, D., Yao, M., Fan, Y., & Ma, C. (2018). Strategies to achieve high performance piezoelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 55(12), 1-5. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.053>.
- Jaramillo, A. F., López, M. G., & Muñoz, K. J. (2018). Diseño De Un Prototipo De Baldosas Inteligentes De Alto Tráfico Para Implementación En El Sistema De Transporte Público Transmilenio De La Ciudad De Bogotá. *Titulo de Grado*. Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado el 15 de 03 de 2020
- Kumar, B., & Kim, S.-W. (2011). Recent Advances in Power Generation Through Piezoelectric Nanogenerators. *Journal of Materials Chemistry*, 4-12. doi:DOI: 10.1039/C1JM13066H
- Lin Wang, Z. (2019). Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors. *ACS Publications*, 7(11), 1-5. Obtenido de ACS Publications: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nn404614z>
- Lin, Z. (2019). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. *Nano Energy*, 1(1), 3-4. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104272>
- Malmcrona, A. M. (2018). Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía. *Trabajo Fin de Grado*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Natraj, V. (2019). Introduction to Nanogenerators. *National Institute Of Engineering*, 1(1), 8-9. Obtenido de <https://n9.cl/y6dt5>
- Pan, S., & Zhang, Z. (2019). Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. *Friction*, 3-8. doi:<https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>
- Pozo Barrueta, H. (19 de 03 de 2019). Ley Orgánica de Eficiencia Energética. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Quintero, S., Fontalvo, J., & Galvis, M. (2019). Factibilidad técnica y económica de un sistema de baldosas piezoeléctricas como fuente de energía alternativa para iluminación de bajo consumo en la carrera séptima en la ciudad de Valledupar. *Trabajo de Grado*. Universidad de santander, Valledupar. Obtenido de <http://repositorio.udes.edu.co/handle/001/1535>
- Rayas, A., Rodriguez, R., & Martinez, A. (2003). Medición del módulo de Young en el hule de látex usando ESPI. *Revista Mexicana de Física*, 1-2. Recuperado el 02 de 01 de 2020
- Rodrigues, C., Gomes, A., Ghosha, A., & Ventura, J. (2019). Power-generating footwear based on a triboelectric-electromagneticpiezoelectric. *Nano Energy*, 62, 1-3. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.063>
- Rodríguez Mendoza, I. (2015). *Extracción de energía del agua mediante generadores piezoeléctricos*. Madrid.
- Rodríguez Mendoza, I. (2015). Extracción de Energía del Agua mediante generadores piezoeléctricos. (*Tesis de Grado*). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.



- Shao, J., Jiang, T., Tang, W., & Xu, L. (2018). Studying about Applied Force and the Output Performance of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy*, 18, 4-5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.067>
- Sotelo Delgadillo, R., & Nieto Cañón, E. (s.f.). Análiss técnico y económico del potencial de generación eléctrica a través de dispositivos piezoeléctricos. *Tesis de (Grado)*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- Tamayo Zapata, D., & Cardozo Gutiérrez, N. (2017). El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá. *Trabajo de Investigación*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10983/14488>
- Wang, Z. L. (2014). Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors—Principles, problems and perspectives. *ASC NANO*, 7(11), 5-10. doi: 10.1021/nn404614z
- Xia, K., Du, C., Zhua, Z., & Wang, R. (2019). Sliding-mode triboelectric nanogenerator based on paper and a self-powered velocity and force sensor. *Nano Energy*, 61. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.04.057>
- Xu, L., Zhao, M., Shi, M., & Lu, X. (2019). Triboelectric nanogenerators with simultaneous outputs in both single-electrode mode. *Nano Energy*, 66, 2-5. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104169>
- Yang, W., & Han, C. (2015). Energy Harvesting Simulation of Piezoelectric ZnO for Electromechanical Nanogenerators. *Advances in Energy Engineering (AEE)*, 1(4), 2-3. Obtenido de <https://n9.cl/m6i7>
- Yao, M., Fan, M., Hu, D., & Liu, M. (2018). Strategies to achieve high performance piezoelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 5(12), 11-12. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.053>
- Zhang, S., Gong, W., Zhang, Q., & Brugger, J. (2018). All-fiber hybrid piezoelectric-enhanced triboelectric nanogenerator for wearable gesture monitoring. *Nano Energy*, 48, 1-5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.033>
- Zhang, Y., Pu, X., Liu, M., Chen, X., Sun, J., Du, C., . . . Wang, Z. L. (31 de 05 de 2017). Ultrastretchable, transparent triboelectric nanogenerator as electronic skin for biomechanical energy harvesting and tactile sensing. *Science Advance*, 2-7. doi:10.1126/sciadv.1700015

## Anexos

### Anexo A: Dimensionamiento del capacitor para el circuito de control de carga

El prototipo de baldosa piezoeléctrica cuenta con un circuito externo de control de voltaje el cual incluye un puente rectificador de onda completa que ayuda a convertir la señal alterna que generan los dispositivos piezoeléctricos en una señal continua, es decir elimina la parte negativa de la onda sinusoidal como se puede observar en la Figura 46.

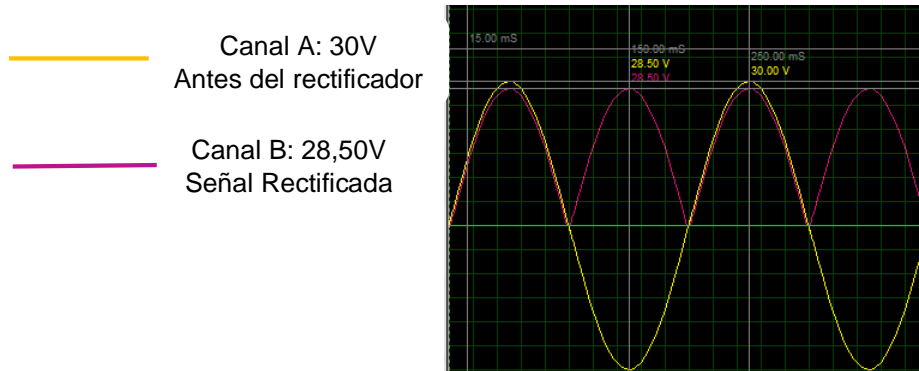


Fig. 46. Formas de onda antes y después del puente rectificador  
Fuente: Autor

A la salida de la etapa rectificadora con la configuración del canal B se obtuvo un voltaje de 28.50V el valor se ve afectado porque el puente rectificador está compuesto por cuatro diodos internos dos de ellos actúan al momento de rectificar la parte negativa lo que provoca una caída de voltaje de 0,7V cada uno, es por eso que el voltaje de la onda rectificada es menor. Después de la rectificación se colocó un condensador de 220uF como se puede observar en la Figura 47 para filtrar el voltaje, cabe mencionar que entre mayor sea la capacitancia de filtrado el tiempo de carga y descarga va a ser mayor disminuyendo así el voltaje de rizado.

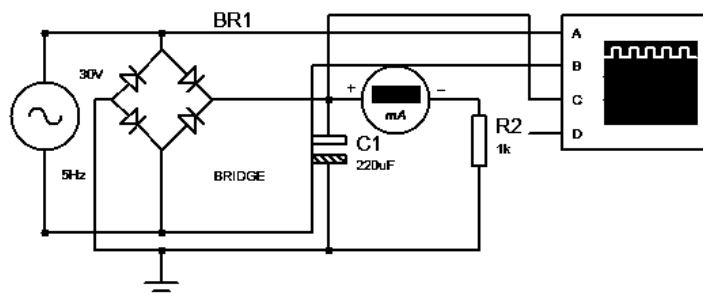


Fig. 47. Circuito rectificador de voltaje con su etapa de filtrado  
Fuente: Autor

Los resultados al filtrar el voltaje se pueden observar en la Figura 48 con la configuración del canal B se puede apreciar la forma de onda luego de colocar un capacitor de 220uF en la simulación se obtuvo un valor de voltaje de rizado  $V_R$  de aproximadamente 8V.

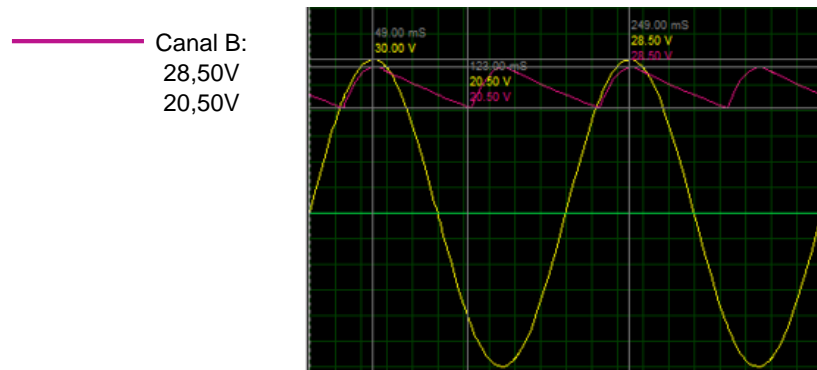


Fig. 48. Voltaje de rizado con una capacitancia de 220uF  
Fuente: Autor

Con el fin de reducir el  $V_R$  es necesario redimensionar el valor de la capacitancia del capacitor de filtrado colocado anteriormente con el fin de obtener una señal lo más continua posible y así estabilizar el voltaje antes de colocar la carga. Para poder calcular el nuevo valor y redimensionar el capacitor se puede usar la siguiente formula.

$$V_r = \frac{I}{fC}$$

Donde

$V_r$ : es el voltaje de rizado

$I$ : es la corriente

$f$ : es la frecuencia de línea

$C$ : es la capacitancia.

$$C = \frac{I}{2 \cdot f \cdot V_r}$$

$$C = \frac{28 \times 10^{-3}}{2 \cdot 5 \cdot 8}$$











$$C = 350 \mu F \cong 330 \mu F$$

El resultado obtenido del nuevo valor de capacitancia para reducir el voltaje de rizado y estabilizar el voltaje de salida es de 350uF sin embargo al ser un prototipo real se buscó un valor comercial determinado usar un capacitor de 330uF por debajo del valor obtenido sin embargo también se podría usar uno superior al resultado obtenido que es de 470uF siendo también es un valor comercial tomando en cuenta que a mayor capacitancia mayor tiempo de carga y descarga por lo cual el rizado sería menor y el voltaje más estable a la salida del circuito.

## Anexo B: Programación por diagrama de bloques

LabVIEW crea automáticamente una sección de diagrama de bloques con el fin de interrelacionar cada elemento insertado en su pantalla de desarrollo matemático. Cada elemento se representa como un bloque con su respectivo terminal de conexión los cuales ayudan a interconectar cada elemento programando así una secuencia de cálculo automática. A continuación, se detalla los elementos insertados para la programación tanto del generador como nanogenerador piezoeléctrico.

TABLA 17.  
CONTROLES Y FUNCIONES EN LABVIEW

Controls		
<b>Numeric control</b>		<b>Numeric</b> Permite ingresar valores numéricos
<b>Numeric Indicator</b>		<b>Numeric 2</b> Permite Mostrar valores
Funcions		
<b>Add</b>		Suma
<b>Multiply</b>		Multiplica
<b>Divide</b>		Divide
<b>Square</b>		Eleva a un exponente
<b>DBL numeric constant</b>		Valor constate decimal
<b>Numeric constant</b>		Valor constante entero
<b>Pi</b>		Función Pi
<b>Line</b>		Interconexión de elementos

Fuente: Autor

En la sección función numérica se puede encontrar la mayoría de operaciones detalladas en la Tabla 17 a excepción de los elementos Numeric Control y Numeric Indicator los cuales son insertados automáticamente al colocar un elemento de texto o campo numérico desde el panel principal de desarrollo visual. Una vez insertado los elementos de control y cálculo simplemente es necesario unir de acuerdo a la secuencia deseada formando así el resultado automático interrelacionado los valores ingresados y calculados dentro de la misma aplicación de LabVIEW.

## Generador piezoeléctrico

La programación que se puede apreciar en la Figura 49 modela las Ecuaciones 14 y 15 detalladas en el Capítulo 2 interrelacionando cada variable a través de funciones matemáticas básicas obteniendo así los resultados de las incógnitas deseadas.

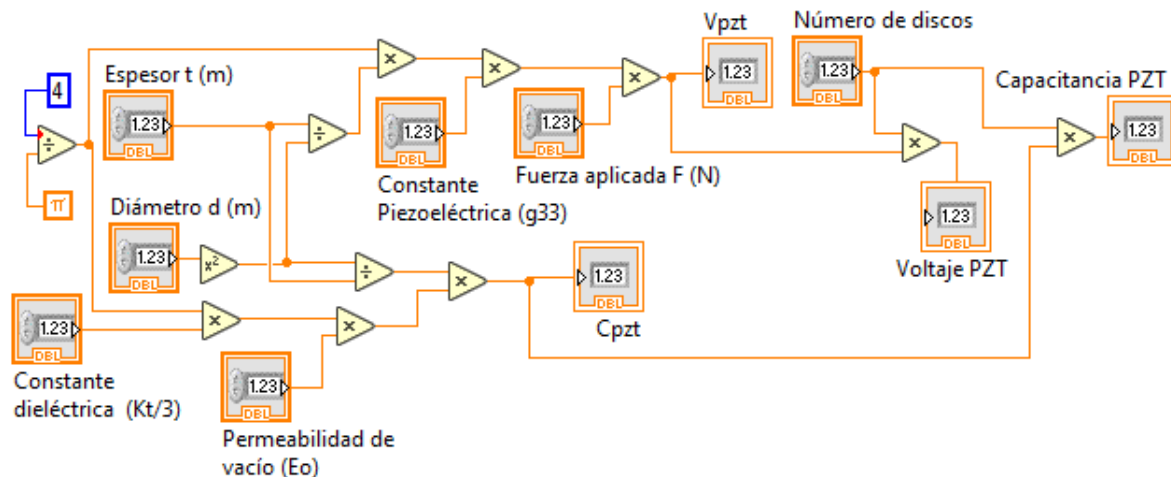


Fig. 49. Conexión de terminales para obtener Voltaje y Capacitancia  
Fuente: Autor

A través de funciones numéricas se relacionó cada variable para lograr programar automáticamente el cálculo de  $V_{PZT}$  y  $C_{PZT}$ . En este plano cada terminal transmite internamente el valor calculado usando líneas de conexión por lo cual los valores pueden ser tomados para relacionar con cualquier otro bloque logrando así armar las ecuaciones de forma gráfica también se usó funciones para valores constantes logrando representar internamente algunos valores constantes detallados en cada ecuación.

## Nanogenerador Piezoeléctrico

A partir del modelado matemático del generador piezoeléctrico también se realizó el modelo y demostración matemática del nanogenerador modelando la Ecuación 21 en la cual se toma en cuenta el factor de miniaturización de los elementos sin afectar a las propiedades del sustrato de la misma manera que el generador piezoeléctrico para el desarrollo de las fórmulas del nanogenerador se ingresó las variables conocidas y se calculó los valores de las incógnitas o variables necesarias para poder aplicar la fórmula como se puede apreciar en la Figura 50 al obtener los resultados se interrelaciono cada elemento modelando así la ecuación antes mencionada y obteniendo los resultados de generación a través del software LabVIEW.

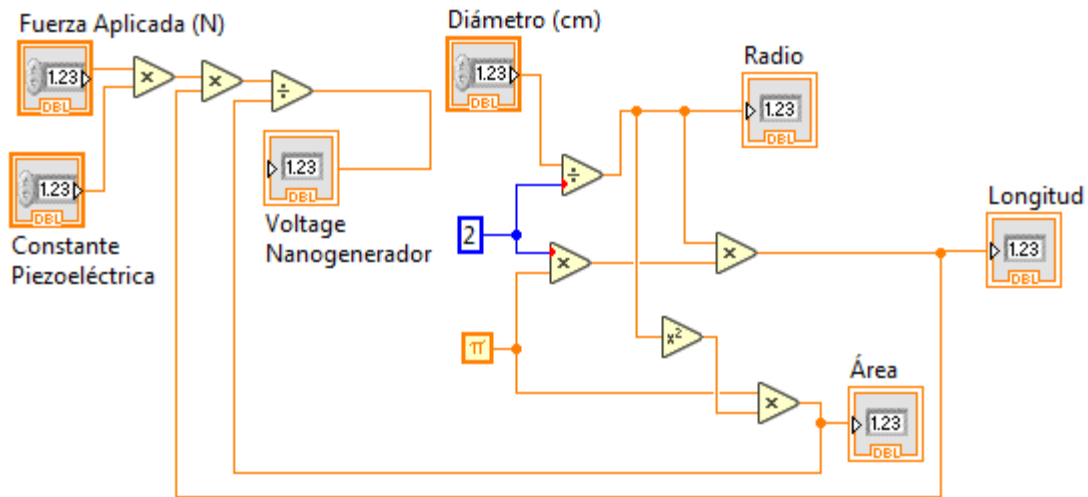


Fig. 50. Programación del nanogenerador Piezoeléctrico  
Fuente: Autor

Una vez conocido el valor de voltaje a generar por el nanogenerador piezoeléctrico se realiza una comparativa entre la generación por área con el generador, en el modelo se ingresó el área de contacto tanto del G como del NG para de esta manera conocer la cantidad de nanogeneradores que reemplazarían un solo disco generador usado en el prototipo realizado en este trabajo.

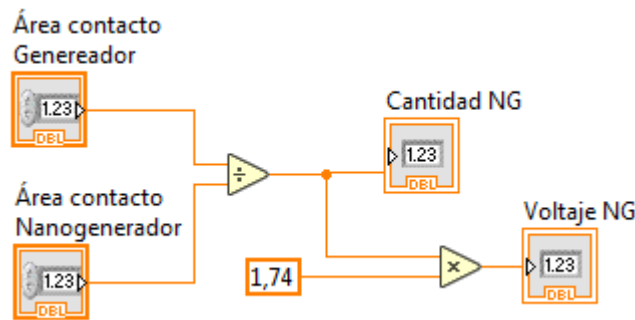


Fig. 51. Programación para conocer el voltaje de un nanogenerador  
Fuente: Autor

En la Figura 51 se puede apreciar la interconexión de los bloques a través de sus terminales de conexión usando campos para valores numéricos, funciones matemáticas básicas y valores constantes en el caso del voltaje de 1,74V que es el dato de referencia generado por un nanogenerador de sustrato PZT.

## Anexo C: Acta de entrega del prototipo de baldosa piezoeléctrica



### Universidad Técnica del Norte ACTA ENTREGA – RECEPCION

#### CLAUSULA I.-

En la ciudad de Ibarra el 13 de mayo del año 2021, comparece:

El señor estudiante:

N.º	Nº CEDULA	NOMBRE
1	100404166-9	Molina Chafuelan Milton Fernando

Estudiante de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico período marzo 2020 - agosto 2020 en calidad de Donante de un prototipo de una baldosa piezoeléctrica y una aplicación de cálculo de generación y nano generación tribo y piezoeléctrica como parte de la investigación "MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE NANOGENERADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LOS EFECTOS TRIBO Y PIEZOELÉCTRICO", cuyos elementos se encuentran en perfecto estado de funcionamiento y se detallan a continuación.

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	
TEMA DE TRABAJO DE GRADO: MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE NANOGENERADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LOS EFECTOS TRIBO Y PIEZOELÉCTRICO.	
1	Prototipo de baldosa piezoeléctrica compuesta por una capa base, una capa de presión y un circuito de control de carga.
1	CD con la aplicación de cálculo de generación piezoeléctrica desarrollado en el software LabVIEW.

#### CLAUSULA II:

La donación de lo antes indicado es para uso exclusivo como material didáctico para futuras investigaciones de los estudiantes y tiene como finalidad mejorar el aprendizaje y promover la investigación en los estudiantes de carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.


A partir de la presente fecha, queda bajo responsabilidad y custodia del Ing. Jairo Revelo Técnico Docente A Cargo del laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

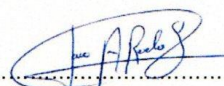
Entregue Conforme:

  
Molina Chafuelan Milton Fernando  
Estudiante

  
Firmado electrónicamente por:  
GERARDO ISAIAS  
COLLAGUAZO  
GALEANO  
PhD. Gerardo Collaguazo  
Tutor de Tesis

Recibí Conforme

  
Firmado electrónicamente por:  
GERARDO ISAIAS  
COLLAGUAZO  
GALEANO  
PhD. Gerardo Collaguazo  
COORDINADOR CIMANELE

  
Ing. Jairo Revelo  
TECNICO DOCENTE CIMANELE