# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**TEMA:**

## "DISEÑO DE UN GENERADOR TRIBOELÉCTRICO UTILIZANDO MATERIALES DE RESIDUOS LOCALES PARA SU APLICACIÓN EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOSTENIBLE"

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


**AUTOR (A):**

Byron Marcelo Imbaquingo Simbaña

**DIRECTOR (A):**

MSc. Julio Esteban Guerra Masson


Ibarra, febrero 2025

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

**IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

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

| DATOS DE CONTACTO | | | |
|---|---|---|---|
| **CÉDULA DE IDENTIDAD:** | 1003969993 | | |
| **APELLIDOS Y NOMBRES:** | Imbaquingo Simbaña Byron Marcelo | | |
| **DIRECCIÓN:** | Ibarra | | |
| **EMAIL:** | bmimbaquingos@utn.edu.ec | | |
| **TELÉFONO FIJO:** | | **TELÉFONO MÓVIL:** | 0959022976 |

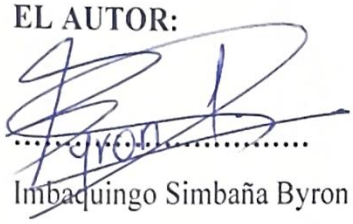
| DATOS DE LA OBRA | |
|---|---|
| **TÍTULO:** | Diseño de un generador triboeléctrico utilizando materiales de residuos locales para su aplicación en la generación de energía eléctrica sostenible. |
| **AUTOR (ES):** | Imbaquingo Simbaña Byron Marcelo |
| **FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA** | 21/02/2025 |
| **PROGRAMA:** | ■ **PREGRADO** □ **POSGRADO** |
| **TITULO POR EL QUE OPTA:** | Ingeniero Eléctrico |
| **ASESOR /DIRECTOR:** | MSc. Guerra Masson Julio Esteban |

## 2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 24 días del mes de febrero de 2025

**EL AUTOR:**



Imbaquingo Simbaña Byron Marcelo

CI.1003969993

## CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, MSc. Guerra Masson Julio Esteban en calidad de director del señor estudiante Imbaquingo Simbaña Byron Marcelo certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "DISEÑO DE UN GENERADOR TRIBOELÉCTRICO UTILIZANDO MATERIALES DE RESIDUOS LOCALES PARA SU APLICACIÓN EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOSTENIBLE"

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

.....

MSc. Julio Esteban Guerra Masson

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios, por saber guiarme mis pasos donde su bondad me llena de paz y fortaleza, frente a las adversidades diarias. Quiero agradecer a mis padres, por brindarme su apoyo incondicional y consejos a lo largo de los años, el cual siempre fueron motivo de superación en salir adelante en la vida. A mi hermana mayor, gracias por su cariño y bondad, donde sus palabras de aliento y consejos, siempre me inspiran a crecer en el ámbito personal, profesional, a mi hermano, donde siempre me incentiva con su aliento de apoyo constante para a cumplir mis metas, en lo cual siempre fueron motivo de persistencia y esfuerzo diario.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar una nueva etapa de mi vida, a mi familia por su apoyo en salir adelante en la vida, para progresar académicamente, personalmente, también a las demás personas que creyeron en mí.

Quiero agradecer a mi director de tesis a el MSc. Julio Esteban Guerra Masson, gracias a sus enseñanzas indicadas y la paciencia a lo largo del desarrollo del proyecto de grado, donde con sus relevantes aportaciones, fue posible en culminar el trabajo de investigación.

Además, quiero agradecer a los docentes académicos, gracias a sus conocimientos impartidos en el aula de clase, a cada uno de nosotros. Así mismo a mis amigos y compañeros de clase, donde se compartió conocimientos, fraternidad he hicieron una vida estudiantil más llevadera.

**Tabla de contenido**

RESUMEN ..... XIII

ABSTRACT ..... XIV

CAPITULO I ..... 1

INTRODUCCIÓN ..... 1

Contextualización ..... 1

Planteamiento del problema ..... 2

Formulación Problema ..... 2

Objetivos ..... 2

Objetivo General ..... 2

Objetivos Específicos ..... 3

Alcance ..... 3

Justificación ..... 4

CAPÍTULO II ..... 6

MARCO TEÓRICO ..... 6

Antecedentes ..... 6

2.1 Recolección de energía (Energy Harvesting) ..... 7

2.1.1 Recolección de energía triboeléctrica ..... 8

2.2 Triboelectrificación ..... 9

2.2.1 Efecto triboeléctrico ..... 9

2.2.2 Parámetros en la triboelectrificación ..... 10

2.2.3 Serie triboeléctrica ..... 11

2.3 Materiales triboeléctricos ..... 14

2.3.1 Polímero sintético ..... 16

2.3.2 Biopolímero ..... 17

2.3.3 Polímero semisintético ..... 19

2.3.4 Polímero termoplástico ..... 19
2.4 Generador triboeléctrico ..... 20
2.4.1 Modo contacto-separación vertical ..... 24
2.4.2 Modo deslizamiento lineal ..... 27
2.4.3 Modo electrodo único ..... 27
2.4.4 Modo capa triboeléctrica-independiente ..... 28
2.4.5 Aplicaciones ..... 30
CAPÍTULO III ..... 31
MÉTODOS Y MATERIALES ..... 31
3.1 Métodos ..... 31
3.2 Diseño de la investigación ..... 32
3.3 Metodología ..... 32
3.4 Materiales para diseño generador triboeléctrico ..... 34
3.5 Diseño generador triboeléctrico ..... 44
3.6 Ecuaciones matemáticas en la caracterización generador triboeléctrico ..... 51
3.6.1 Voltaje circuito abierto ..... 54
3.6.2 Corriente corto circuito generador triboeléctrico modo contacto ..... 55
3.6.3 Densidad carga triboeléctrica ..... 56
CAPITULO IV ..... 59
RESULTADOS Y ANÁLISIS ..... 59
4.1 Nanoestructura celulosa bagazo caña de azúcar ..... 59
4.2 Mecanismo funcionamiento generador triboeléctrico ..... 60
4.3 Medición voltaje circuito abierto generador triboeléctrico ..... 62
4.4 Cálculo densidad carga triboeléctrica generador ..... 64
4.5 Diseño sistema almacenamiento energía ..... 66
Conclusiones ..... 71
Recomendaciones ..... 72

Referencias ..... 73

Anexos ..... 83

## Índice de figuras

**Fig. 1.** Fuentes de energía aprovechables [9] ..... 7
F**ig. 2.** Diagrama de recolección energía triboeléctrica. [11] ..... 8
**Fig. 3.** Materiales triboeléctricos [22] ..... 15
**Fig. 4.** Elección materiales triboeléctricos [24] ..... 16
**Fig. 5.** Materiales celulósicos [29] ..... 18
**Fig. 6.** Materiales biodegradables [11] ..... 19
**Fig. 7.** Polímeros termoplásticos. [31] ..... 20
**Fig. 8.** TENG PET-KAPTON. (a) Estructura TENG. (b) Mecanismo TENG. [18] ..... 21
**Fig. 9.** Esquema TENG, modo contacto. [36] ..... 23
**Fig. 10.** Modos de operación TENG: modo separación vertical, modo deslizamiento lateral, modo de electrodo único, modo capa independente. [39] ..... 24
**Fig. 11.** Modo contacto vertical. [40] ..... 25
**Fig. 12.** Modelos teóricos. (a) TENG en modo de contacto dieléctrico-dieléctrico. (b) TENG modo contacto conductor-dieléctrico. (c) Circuito equivalente para placa paralela de electrodo unido de conductor a dieléctrico TENG. [41] ..... 25
**Fig. 13.** Modo deslizamiento lateral. [40] ..... 27
**Fig. 14.** Modo electrodo simple. [40] ..... 28
**Fig. 15.** Modo independiente capa triboeléctrica. [40] ..... 28
**Fig. 16.** Diagrama aplicaciones TENG. [52] ..... 30
**Fig. 17.** Diagrama de flujo metodología ..... 32
**Fig. 18.** Proceso extracción fibra de bagazo de caña de azúcar. (a) Residuo bagazo de caña de azúcar. (b) Desmenuzamiento fibra bagazo caña. (c) Recolección fibra bagazo de caña de azúcar. (d) Tamizado residuo de caña de azúcar. ..... 37
**Fig. 19**. Diagrama de flujo. – Síntesis obtención celulosa, fibra bagazo ..... 38
**Fig. 20.** Proceso obtención celulosa a partir bagazo de caña de azúcar. (a) Recolección fibra bagazo de caña. (b) Dispersión y secado fibra bagazo. (c) Blanquimiento fibra. (d) Celulosa fibra de caña de azúcar. ..... 39
**Fig. 21**. Envases botellas plásticas PET. ..... 40
**Fig. 22**. Diagrama de flujo. Reciclaje botellas PET ..... 41
**Fig. 23.** Material triboeléctrico PET ..... 42
**Fig. 24**. Diagrama de flujo. Obtención láminas PET. ..... 42

**Fig. 25.** Procedimiento elaboración Lámina PET-celulosa caña. a) Trituración celulosa. b) Preparación hornilla. c) Calentamiento PET. d) Mezclado PET-celulosa caña de azúcar. ..... 43
**Fig. 26.** Modelo TENG 3D, modo contacto. ..... 44
**Fig. 27.** Soporte generador triboeléctrico. ..... 46
**Fig. 28**. Medidas soporte material PET. ..... 47
**Fig. 29.** Cinta de aluminio ..... 47
**Fig. 30.** Lámina dieléctrica PET-celulosa caña de azúcar. ..... 48
**Fig. 31.** Lámina PVC ..... 48
**Fig. 32.** Montaje TENG ..... 49
**Fig. 33.** Generador triboeléctrico. (a) Vista superior TENG. (b) Vista frontal TENG. . 50
**Fig. 34.** Cirquito equivalente TENG. [62] ..... 52
**Fig. 35.** TENG modo contacto dieléctrico-dieléctrico. [41] ..... 53
**Fig. 36**. Ilustración TEM, nanocelulosa. [48] ..... 59
**Fig. 37.** Mecanismo funcionamiento generador triboeléctrico. ..... 61
**Fig. 38.** Motor eléctrico lineal. ..... 62
**Fig. 39.** Diagrama circuito esquemático generador triboeléctrico ..... 67
**Fig. 40.**Diagrama TENG - Puente diodos ..... 68
**Fig. 41.** Diagrama TENG-Capacitor. ..... 69

## Índice de tablas

**TABLA 1.** Densidad de carga superficial después de trasferencia de carga triboeléctrica. [16] ..... 10
**TABLA 2.** Serie triboeléctrica – cargas positivas y negativas. [16] ..... 11
**TABLA 3.** Serie material triboeléctrico - densidad carga triboeléctrica. [19] ..... 13
**TABLA 4.** Especificaciones nano generador triboeléctrico. [17] ..... 22
**TABLA 5.** Materiales para diseño generador triboeléctrico. ..... 34
**TABLA 6.** Configuración parámetros de diseño generador triboeléctrico ..... 45
**TABLA 7.** Análisis SEM - láminas dieléctricas ..... 60
**TABLA 8.** Medición voltaje, distancia entre capa dieléctrica 0.015 m ..... 63
**TABLA 9.** Medición voltaje circuito abierto, distancia entre capas dieléctricas de 0.03 m ..... 63
**TABLA 10.** Resultado mediciones voltaje circuito abierto ..... 64
**TABLA 11.** Densidad carga triboeléctrica, distancia de 0.015 m. ..... 65
**TABLA 12.** Densidad carga triboeléctrica, distancia de 0.03 m. ..... 65

# RESUMEN

En el transcurso de los años, la creciente demanda de energía eléctrica ha impulsado en la búsqueda de nuevas fuentes alternativas de energía ecológica y además sostenible, como el uso de la energía renovable. Por otro lado, uno de los inconvenientes en la actualidad es el incremento de materiales residuales, inorgánicos y orgánicos. El presente trabajo aborda el diseño de un generador triboeléctrico, el cual consiste en generar electricidad, donde convierte la energía mecánica en eléctrica, mediante el contacto entre materiales e inducción estática. Se investigo diferentes combinaciones entre pares de materiales triboeléctricos, para generar electricidad, a partir de materiales residuales como las botellas plásticas compuestas por el material del Tereftalato de Polietileno (PET), de la misma forma en la utilización del desecho natural agrícola biodegradable, como el bagazo de caña de azúcar, lo cual contiene un alto nivel de celulosa. Además, en un material comúnmente utilizado como el polímero cloruro de polivinilo (PVC). El generador triboeléctrico contribuye al desarrollo de tecnologías sustentables mediante la exploración de materiales reciclables reduciendo el impacto ambiental de los desechos en la fabricación. Esta nueva forma de generar electricidad es una fuente innovadora para la generación de energía eléctrica en entornos de sostenibilidad, biodegradabilidad. El generador triboeléctrico diseñado, genero un voltaje de circuito abierto de 54.1 V, mientras que la corriente de corto circuito se obtuvo 1.51 $\mu A$. Los materiales reciclables pueden utilizarse para la fabricación de un generador triboeléctrico, proporcionando una alternativa ecológica, donde el uso de esta nueva manera de generar energía promueve a la recolección de la energía verde.

**Palabras clave:** generador, bagazo, PET, celulosa, biopolímero, triboeléctrico, reciclaje, TENG, caña.

# ABSTRACT

Over the years, the growing demand for electrical energy has led to the search for new alternative sources of green and sustainable energy, such as the use of renewable energy. On the other hand, one of the drawbacks at present is the increase in residual materials, inorganic and organic. The present work deals with the design of a triboelectric generator, which consists in generating electricity, where it converts mechanical energy into electrical energy, through the contact between materials and static induction. Different combinations between pairs of triboelectric materials are investigated to generate electricity from residual materials such as plastic bottles made from the material of Polyethylene Terephthalate (PET), in the same way as the use of biodegradable natural agricultural waste such as sugarcane bagasse, which contains a high level of cellulose. In addition, in a commonly used material such as polyvinyl chloride (PVC) polymer. The triboelectric generator contributes to the development of sustainable technologies by exploring recyclable materials and reducing the environmental impact of waste in manufacturing. This new way of generating electricity is an innovative source for electric power generation in environments of sustainability and biodegradability. The triboelectric generator designed, generate an open circuit voltage of 54.1 V while the short circuit current was obtained 1.51 μA. Recyclable materials can be used for the manufacture of a triboelectric generator, providing an environmentally friendly alternative, where the use of this new way of generating energy promotes the collection of green energy.

**Keywords:** generator, bagasse, PET, cellulose, biopolymer, triboelectric, recycling, TENG, cane.

# CAPITULO I

# INTRODUCCIÓN

## Contextualización

En el lapso del tiempo, la sociedad humana ha utilizado recursos naturales para la generación eléctrica. Según [1], las fuentes de energía clasificadas como no renovables son aquellas que, se agotan por el uso humano, se desvanecen durante su utilización en lugar de reponerse. Hay dos categorías de fuentes de energía no renovables que se utilizan actualmente: la energía nuclear y los combustibles fósiles.

La energía no convencional, a veces llamada energía alternativa, se compone de una variedad de fuentes de energía que se regeneran de forma natural, donde son esencialmente ilimitadas en el tiempo [2] . Las energía renovable, hoy en día son de gran importancia. Se podría encontrar que existen centros de apoyo e incentivos para la eficiencia energética que fomente la creación de nuevas fuentes de generación sostenibles y renovables, contribuyendo a proteger el medio ambiente.

Debido a la necesidad de utilizar e innovar con la energía renovable, se ha podido desarrollar nuevas formas para la generación de electricidad. Se puede decir que, para generar electricidad, mediante la energía mecánica a energía eléctrica por la fricción de los materiales, gracias a el efecto triboeléctrico, donde el generador triboeléctrico puede ser diseñado con materiales que cuentan con propiedades triboeléctricas, para la generación de electricidad [3].

Al utilizar las energías renovables contribuye al cuidado del medio ambiente que se presentan en la actualidad, como la lluvia ácida, cambio climático, contaminación atmosférica, además de reducir el dióxido de carbono. Las fuentes de energía de recursos renovables pueden suministrar una proporción ideal del consumo de electricidad. El aumento de la utilización de fuentes de energía renovables determina la producción a largo plazo de la generación de la electricidad sostenible [3].

## Planteamiento del problema

A medida de transcurso del tiempo, la sociedad humana ha sido objeto de la utilización de recursos no renovables como los combustibles fósiles, donde podemos encontrar el gas natural, carbón, y otros componentes derivados del petróleo que son utilizados en la industria, que cada vez el porcentaje de uso aumenta, esto es debido a la creciente demanda energética.

Por otro lado, la acumulación de desechos residuales como los productos plásticos, donde representa un gran daño ambiental debido a su degradación en la naturaleza, además de los residuos orgánicos que son desechados al medio ambiente, sin los respectivos procesos ecológicos, generan gases de efecto invernadero, estos residuos son desechados a diario en una gran escala, sin embargo, con los nuevos avances tecnológicos, se busca reutilizarlos y establecer un nuevo ciclo de uso.

Por esa razón debido al daño al ambiental ha sido objeto de nuevos avances tecnológicos, el uso de la energía no convencional es una nueva manera de aprovechar los recursos naturales, como el aprovechamiento de la energía mecánica, en lo cual consiste en transformar la energía mecánica a energía eléctrica, esto es debido al efecto triboeléctrico, este proceso puede ser usado por un innovador mecanismo como el generador triboeléctrico, donde además utiliza materiales reciclables, para generar electricidad. De esta forma se aprovecha la energía renovable, brindado la no dependencia de fuentes nos renovables.

## Formulación Problema

¿Qué capacidad de generación energética se puede lograr con un generador triboeléctrico diseñado a partir de materiales reciclados?

## Objetivos

## Objetivo General

Diseñar un generador triboeléctrico mediante el uso de materiales reciclables, para la generación de energía eléctrica a partir del rozamiento.

## Objetivos Específicos

1. Analizar los procesos que mejoren las propiedades triboeléctricas de los materiales utilizados en el generador TENG.

2. Seleccionar materiales reciclados que contengan cualidades triboeléctricas adecuadas en la generación de energía eléctrica.

3. Diseñar un mecanismo de recolección y almacenamiento eficiente de la carga eléctrica generada por el generador triboeléctrico.

## Alcance

En el presente proyecto del generador triboeléctrico, consiste en el diseño del generador triboeléctrico, el cual tiene como fundamento principal en el rozamiento o fricción entre dos materiales con carga eléctrica, que da lugar al efecto triboeléctrico para generar energía eléctrica. Para su construcción se establecerá un mecanismo, que es diseñado como lo es en su estructura o forma de diseño, su esquema eléctrico.

Los materiales para la construcción del generador triboeléctrico, se basa a partir de materiales reciclados como pueden ser láminas de aluminio, cobre, plásticos, gomas y otros materiales que contengan propiedades triboeléctricas para generar carga eléctrica por fricción o rozamiento. Además, que se puede adaptar el generador a diferentes aplicaciones y optimizar su rendimiento al seleccionar los materiales adecuados en sus propiedades triboeléctricas. Para los conductores eléctricos del generador se utiliza electrodos de cobre o aluminio, estos electrodos recolectarán la carga generada por el material triboeléctrico o lámina dieléctrica. Así mismo se puede utilizar un capacitor para almacenar la carga eléctrica o un dispositivo que aproveche la corriente generada.

Los generados triboeléctricos, transforma la energía mecánica en electricidad, lo cual aprovecha la fricción o rozamiento entre materiales con cargas triboeléctricas, para generar energía eléctrica. A diferencia de los generadores convencionales que dependen de fuentes de energía externas como combustibles fósiles o energía solar, el generador triboeléctrico aprovecha la energía mecánica disponible en su entorno para generar electricidad.

## Justificación

El desarrollo de fuentes de energía sostenible es una necesidad debido al agotamiento de los recursos no renovables, la energía eléctrica es actualmente esencial en el avance tecnológico de las actividades de la sociedad humana, por esa razón se busca nuevas maneras de generar energía eléctrica de manera sostenible. La utilización de la energía a partir de los recursos renovables es una nueva forma para generar electricidad. "En nuestras vidas utilizamos energía sin estar conscientes de ello; por ejemplo, al presionar un interruptor para encender la luz o los aparatos electrónicos"[4]. La búsqueda continua de innovar con la fabricación de nuevos dispositivos, como lo es un generador triboeléctrico que es capaz de aprovechar los recursos naturales y se pueda utilizar para crear electricidad. Por lo tanto, se ha prestado atención al desarrollo de nuevas fuentes de energía, como la energía renovable o no convencional es una nueva alternativa.

La sociedad humana ha evolucionado a lo largo del tiempo y ha tenido la necesidad de utilizar nuevas formas de tecnologías para cumplir con la demanda en el campo energético. El uso de los recursos renovable es la que se puede obtener de fuentes inagotables o que se podrían renovar, esto no es factible con la energía no renovable. Los recursos naturales más importes son la hidroeléctrica, eólica, biomasa, energía solar y las energías del mar, que cada vez son más utilizadas por el ser humano [5].

Por otro lado, mucha energía mecánica se está desperdiciando como por ejemplo en una actividad cotidiana de personas que trabajan en un computador. Al estar en constante movimiento de sus manos con el computador crea una fricción entre estos materiales o cuerpos, esta actividad da lugar a una energía mecánica que se puede transformar en energía eléctrica, así mismo existe otras actividades donde interviene la energía mecánica que no se está aprovechando [6].

Esta energía renovable se puede implementar en cualquier lugar, donde se pueda encontrar fricción entre dos materiales, así mismo en la necesidad de innovar en nuevas fuentes de energía renovable, es una nueva perspectiva para la creación de energía eléctrica. La producción de energía en todo el mundo se centra en las fuentes de energía renovables, tanto ahora como en el futuro. "Energía renovable es la que proviene de

fuentes de energía que son regeneradas por la naturaleza en una escala temporal relevante para los humanos”[6].

Se utilizará materiales reciclables para su construcción, con lo cual se pretende dar una nueva utilización a los materiales que ya cumplieron su función, es decir en la reutilización. Su material nos sería de gran aporte para la construcción del generador triboeléctrico, aportando con el reciclaje y cuidado del medio ambiente. El diseño de un generador triboeléctrico es una innovadora alternativa en la producción de electricidad aplicada a una manera sostenible, en la actualidad surgen diversas formas para obtener la electricidad, no dependientes de la energía no renovable.

# CAPÍTULO II

# MARCO TEÓRICO

## Antecedentes

En la actualidad la energía eléctrica es indispensable, en los últimos años la energía de recursos renovables ha sido objeto de gran aprovechamiento debido a su nuevo modelo para generar electricidad. “En nuestras vidas utilizamos energía sin estar conscientes de ello; por ejemplo, al presionar un interruptor para encender la luz o los aparatos electrónicos” [4]. Los generadores triboeléctricos utilizan la interacción y separación de materiales con distintas afinidades electrónicas para crear electricidad combinando el fenómeno triboeléctrico con la inducción electrostática, la energía generada gracias al efecto triboeléctrico es un modo innovador en la obtención de la electricidad. Además, este modelo de producción energía eléctrica, consiste en la energía renovable, donde una energía mecánica ambiental, mediante una conversión se obtiene energía eléctrica [4].

Por otro lado, mucha energía mecánica se está desperdiciando como por ejemplo en una actividad cotidiana de personas que trabajan en un computador. Al estar en constante movimiento de sus manos con el teclado de un computador crea una fricción entre estos materiales o cuerpos, esta actividad da lugar a una energía mecánica que se puede transformar en energía eléctrica, así mismo existe otras actividades donde interviene la energía mecánica que no se está aprovechando [4]. Esta energía renovable se puede implementar en cualquier lugar, donde se pueda encontrar fricción entre dos materiales, así mismo en la necesidad de innovar en nuevas fuentes de energía renovable, es una nueva perspectiva para la producción de electricidad. [5].

“Energía renovable es la que proviene de fuentes de energía que son regeneradas por la naturaleza en una escala temporal relevante para los humanos” [6]. Se utilizará materiales reciclables para su construcción, se daría un nuevo uso a materiales que ya cumplieron su función, pero que su material nos sería de gran aporte para la construcción del generador triboeléctrico. La producción de energía energética en todo el mundo se centra en las fuentes de energía renovables, tanto ahora como en el futuro.

## 2.1 Recolección de energía (Energy Harvesting)

Un método para aprovechar la energía consiste la captación de energía de múltiples recursos del medio ambiente, donde este mecanismo se utilizan para generar electricidad, la captación de energía de fuentes de energías ambientales puede reducir la dependencia de la suministración de la energía de baterías o red, lo que tiene varias ventajas medioambientales muy atractivas [7]. Equipos que utilizan Energy Harvesting, cubre diferentes áreas y actualmente propone generadores híbridos como complemento a las fuentes de energía convencionales no demasiado riguroso para el tamaño [8].

La recolección de energía tiene como objetivo alimentar dispositivos de bajo consumo, como sensores inalámbricos, dispositivos portátiles o incluso implantes médicos, sin depender de baterías tradicionales. Es una tecnología crucial para las aplicaciones de Internet, donde es eficaz contar con dispositivos autónomos que no requerirán recargas de energía frecuentes. Existen numerosas fuentes naturales de energía que pueden aprovecharse esta innovadora herramienta [9].

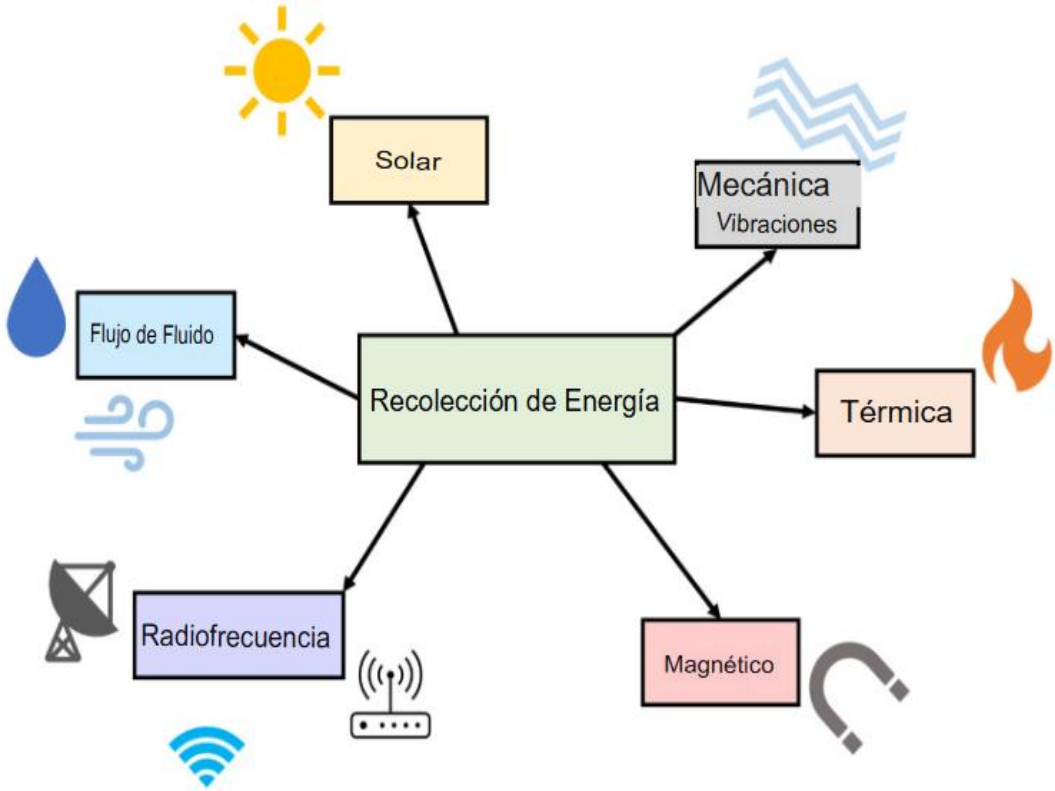



**Fig. 1.** Fuentes de energía aprovechables [9]

### 2.1.1 Recolección de energía triboeléctrica

En inglés (Energy Harvesting Triboelectric). Es la combinación de electrificación de contacto e inducción electrostática, sirve como principio funcional de los dispositivos de recolección de energía triboeléctrica [10]. Un par de materiales distintos, generalmente dieléctricos, se colocan uno frente al otro, con una distancia de separación que puede ajustarse cuando se aplica fuerza mecánica, según la dirección de la fuerza mecánica y la conexión entre los materiales dieléctricos y los electrodos, existen varias categorías de recolectores de energía triboeléctrica [10]. El sistema de Energy Harvesting triboeléctric, se considera un descubrimiento histórico, donde convierte eficientemente la energía mecánica en un nueva energía (eléctrica), proporcionando un enfoque innovador para generar energía renovable que reduzca la dependencia mundial de los combustibles fósiles tradicionales [10].

Gracias a los avances de la tecnología, han desarrollo dispositivos de recolección de energía triboeléctrica, específicamente los nano generadores triboeléctricos (TENG) [11]. En general, un sistema de captación de energía TENG tiene al menos tres partes: una fuente de excitación, un dispositivo de captación de energía y un circuito eléctrico externo, que corresponde a la entrada de energía mecánica, el dispositivo de transformación de energía TENG y la salida de energía eléctrica [11].

Los recolectores de energía triboeléctrica desarrollados hasta ahora tienen diferentes estructuras y diferentes materiales, a medida del tiempo transcurrido, los modelos existentes de los cosechadores o recolectores de energía triboeléctrica han experimentado significativas mejoras en una variedad de áreas de aplicación [11].

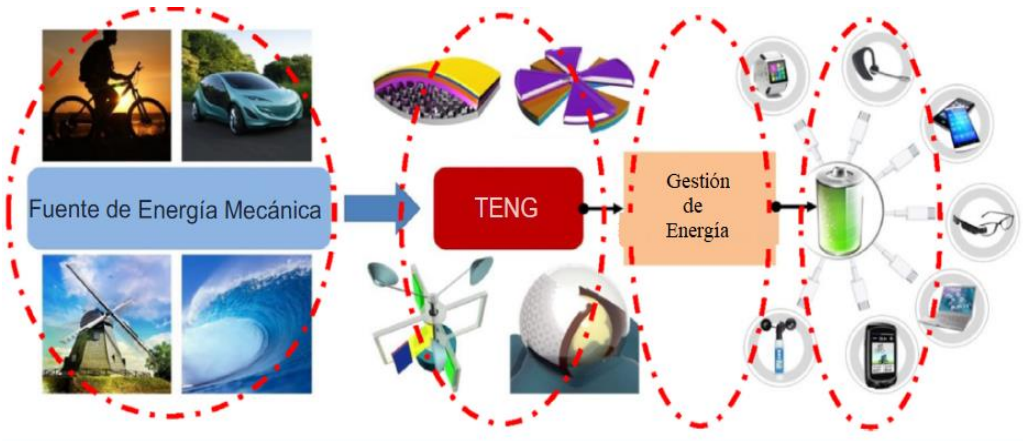



**Fig. 2.** Diagrama de recolección energía triboeléctrica. [11]

## 2.2 Triboelectrificación

Es un fenómeno físico, en el cual 2 materiales diferentes se cargan eléctricamente, este proceso ocurre cuando se produce la interacción de contacto y separación, de esta manera produce transferencia de electrones entre las superficies de los materiales, lo que genera una diferencia de carga eléctrica. Al efecto triboeléctrico, se conoce como electrificación por contacto (CE). La CE coexiste con el efecto triboeléctrico, donde fricción entre materiales no es especialmente tiene la función de la transferencia de carga. Sin embargo, se han sugerido varios procesos, como la transferencia de materia, electrones o iones, aunque el mecanismo electrificación de contacto, no ha sido completamente descubierto[12].

### 2.2.1 Efecto triboeléctrico

La triboelectrificación es un efecto que todos conocemos probablemente desde la época de la antigua Grecia, la triboelectricidad existe en casi en todas partes de nuestra vida y para cualquier material que utilizamos cada día, de modo que no se limita a ningún material en específico [13]. La carga electrostática es un fenómeno natural, que afecta a los materiales a diferentes potenciales. Esta diferencia de potencial se debe a la acumulación de carga. La electricidad estática se produce cuando se separan dos materiales con diferentes constantes dieléctricas. Cuando se acumulan demasiados electrones, se liberan en otro material con una concentración más baja para equilibrar la carga. Los efectos de las descargas eléctricas pueden generar perturbaciones electromagnéticas que pueden ir desde la perturbación del equipo de medición o de audio hasta la destrucción completa de componentes sensibles, incluidas las descargas eléctricas a las personas [14].

Los materiales tienden a reaccionar de manera diferente cuando se cargan por contacto, muchos materiales no retienen una carga significativa en cambio otros materiales fomentan y retienen una carga positiva esencial. Por lo tanto, se clasifican los materiales según su polaridad de carga después de la carga por contacto. La evidencia microscópica recientemente ha indicado, que la carga por contacto puede resultar de la transferencia de material proporciona un incentivo para examinar cómo estos dos factores afectan la carga por contacto [15].

### 2.2.2 Parámetros en la triboelectrificación

El impacto triboeléctrico puede apreciarse estimando los distintos formas de carga y evaluando la carga de la superficie y de la misma forma la profundidad de la infusión de carga. Para ello, se necesitan modelos necesarios y una apreciación cautelosa de los límites significativos. Los electrones pueden ser el medio de carga, partículas o nanomateriales y se aíslan por su límite de carga unitaria [16] .

- **Profundidad-inyección de carga**

Este efecto de la triboelectricidad hará que la carga se desplace con fuerza, se equilibre progresivamente y se mantenga en la interfaz triboeléctrica, por lo tanto, en el caso de que la carga se mantenga, la interfaz triboeléctrica debería tener atributos de capacitancia. Cualquier tipo de los modos de contacto triboeléctricos utilizados, la energía tendrá éxito a una profundidad específica para dar forma a la capacitancia, entonces esta profundidad, se denomina profundidad de inyección de carga ($\lambda$) [16].

- **Densidad-carga superficial**

Un parámetro es la densidad de carga de la superficie, donde se mide el efecto de carga final de dos superficies, este parámetro determinará significativamente la eficiencia de un dispositivo triboeléctrico. Se utiliza como base, donde se analiza los parámetros en términos de la densidad de potencia del área actual, densidad de la energía del volumen. Además, también es un parámetro útil para conectar y examinar parámetros de capacitancia de la superficie y las propiedades eléctricas de la interfaz [16].

**TABLA 1.** Densidad de carga superficial después de trasferencia de carga triboeléctrica. [16]

| **Pares Materiales** | **Densidad de carga $C/m^2$** |
|---|---|
| Cromo-Cromo | $2.02x10^{-8}$ |
| Cromo-Acero | $3.37x10^{-8}$ |
| Cromo-Oro | $6.73x10^{-8}$ |
| Metal-SiO2 (Cuarzo) | $\sim 10^{-5}$ |
| Metal-NaCl | $5.0x10^{-4}$ |
| Metal-Nylon | $\sim 10^{-3}$ |
| Metal-PTFE | $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$ |
| Metal-Poliimida | $3.0x10^{-3}$ |

Muchos estudios previos han contribuido a medir con precisión la densidad de carga superficial en procesos triboeléctricos, como se muestra en la tabla 1.

### 2.2.3 Serie triboeléctrica

La recolección de energía a partir de la triboelectricidad, generalmente se basa en el efecto electrostático generado en la interfaz entre 2 materiales distintos. Este suceso electrostático se produce no sólo entre un material sólido, sino también entre sólidos y líquidos, líquido-líquido y además de un material líquido y gaseoso. En el año 2012 se informó por primera vez sobre un generador basado en la electrostática, la eficiencia de este dispositivo se mejoró cinco veces en un año mediante la optimización de la eficiencia estructural [17]. La serie triboeléctrica enumera a los materiales, desde los materiales a cargarse positivamente (pérdida de electrones), hacia final de la tabla a los materiales con tendencia creciente a cargarse negativamente (ganancia de electrones). Cuanto a mayor distancia se encuentren dos materiales entre sí, mayor será la carga eléctrica transferida [18].

El concepto más crucial en la triboelectrificación es establecer la serie triboeléctrica, en lo cual determina una perspectiva general, cuando se cargan dos materiales cualesquiera cuando entran en contacto por fricción, presión o frotamiento [16]. El más alto de los dos materiales en la serie triboeléctrica, cederá electrones al otro material cuando dos materiales entren en contacto, haciendo que el otro material se cargue positivamente. Por otro lado, en cambio el otro material adquirirá una carga negativa, por lo tanto, la transferencia de carga y en consecuencia la diferencia de potencial generada, aumentan con la distancia entre materiales [16] .

**TABLA 2.** Serie triboeléctrica – cargas positivas y negativas. [16]

| **Cargado más positivamente (+) ∇** | **Cargado más negativamente (-) Δ** |
|---|---|
| Pelaje de conejo, cabello | Latón |
| Vidrio | Plata |
| Mica | Oro |
| Lana | Poliéster (PET) |
| Nylon | Poliestireno |
| Plomo | Acrílico |
| Seda | Cloruro de polivinilo |

| | |
|---|---|
| Aluminio | Cloruro de polivinilo con plastificante |
| Papel | Silicio |
| Madera | Polietileno |
| Ámbar | Polipropileno |
| Lacre | Politrifluorocloroetileno |
| Globo-goma | Teflón (PTFE) |
| Níquel | Caucho de silicona |
| Cobre | Ebonita |

Polímeros con fuerte propensión comprobada a cargarse positivamente, tienen alta constante dieléctrica, alta polaridad e hidrofilia [15]. Se ha demostrado que los polímeros con grupos funcionales de oxígeno (propensos a tener mayor polaridad) tienen una mayor carga positiva, en contra parte que los grupos funcionales de nitrógeno [16] .

Alternativamente se puede encontrar una serie más detallada probada con materiales de referencia. La prueba consiste en medición de carga triboeléctrica, refiriéndose a su densidad (TECD), equivalente a la densidad de carga de superficie ($\sigma s$). Esto ocurre, debido al contacto del material utilizado como referencia y el material escogido en la secuencia triboeléctrica [19]. El mercurio (Hg) es el elemento químico utilizado por su especial composición de metal líquido en el entorno ambiental. El estado líquido maximiza la superficie de contacto entre los pares triboeléctricos, al permitir un contacto más estrecho entre ellos, debido a una mayor difusión en el espacio sólido del objeto de estudio [19] , [20].

En la tabla 3 se muestra los resultados de una clasificación correspondiente a una serie triboeléctrica de polímeros evaluados en contacto con mercurio. La mayoría de los componentes poliméricos de la misma están resinados y cargados negativamente con respecto al mercurio. Esto se debe a que los metales como el mercurio tienen una mayor propensión a transferir electrones extraños que están presentes en su banda de conducción [19]. Ciertos polímeros presentan una carga superficial más consistente que otros, lo que indica variaciones en sus características triboeléctricas. La composición molecular y química de cada material puede ser la causa de esta discrepancia. Del mismo modo, los resultados muestran que el grado de transferencia de carga, está influido por la energía de adhesión entre el mercurio y los polímeros [19].

**TABLA 3.** Serie material triboeléctrico - densidad carga triboeléctrica. [19]

| Materiales | Abr. | Densidad carga triboeléctrica $\mu C/m^2$ | STDEV | α |
|---|---|---|---|---|
| Viton resistente a productos químicos Caucho de fluoroelastómero | | −148,20 | 2.63 | −1,31 |
| Acetal | | −143,33 | 2.48 | −1,27 |
| Garolita Ignífuga | | −142,76 | 1,49 | −1,26 |
| Garolita G-10 | | −139,89 | 1.31 | −1,24 |
| Celulosa transparente | | −133,30 | 2.28 | −1,18 |
| Cloruro de polivinilo transparente | PVC | −117,53 | 1.31 | −1,04 |
| Politetrafluoroetileno | PTFE | −113,06 | 1.14 | −1,00 |
| Caucho de poliuretano resistente a la abrasión. | | −109,22 | 0,86 | −0,97 |
| Acrilonitrilo butadieno estireno | ABS | −108,07 | 0,50 | −0,96 |
| Policarbonato transparente (brillante) | PC | −104,63 | 1,79 | −0,93 |
| Poliestireno | PS | −103,48 | 2.48 | −0,92 |
| Polieterimida Ultem | PEI | −102,91 | 2.16 | −0,91 |
| Polidimetilsiloxano | PDMS | −102,05 | 2.16 | −0,90 |
| Tejido de poliéster (liso) | | −101,48 | 1,49 | −0,90 |
| Garolita aislante eléctrica fácil de mecanizar | | −100,33 | 1,79 | −0,89 |
| Caucho de silicona de alta temperatura apto para uso alimentario | | −94,03 | 0,99 | −0,83 |
| Película de poliimida | KAPTON | −92,88 | 2.58 | −0,82 |
| Película de poliéster DuraLar | PET | −89,44 | 0,86 | −0,79 |
| Fluoruro de polivinilideno | PVDF | −87,35 | 2.06 | −0,77 |
| Polieteretercetona | PEEK | −76,25 | 1,99 | −0,67 |
| Polietileno | PE | −71,20 | 1.71 | −0,63 |
| Caucho de silicona de alta temperatura | | −69,95 | 0,50 | −0,62 |
| Garolita resistente al desgaste | | −68,51 | 1,99 | −0,61 |
| Polietileno de baja densidad | PEBD | −67,94 | 1,49 | −0,60 |
| Poliestireno de alto impacto | | −67,37 | 1,79 | −0,60 |
| Polietileno de alta densidad | PEAD | −59,91 | 1,79 | −0,53 |
| Caucho EPDM resistente a la intemperie | | −53,61 | 0,99 | −0,47 |
| Tira de cuero (lisa) | | −52,75 | 1.31 | −0,47 |
| Nailon fundido 6 relleno de aceite | | −49,59 | 0,99 | −0,44 |
| Acrílico fundido transparente | PMMA | −48,73 | 1.31 | −0,43 |
| Silicona | | −47,30 | 1,49 | −0,42 |
| Caucho SBR resistente a la abrasión | | −40,13 | 1.31 | −0,35 |
| Tira de cuero flexible (Lisa) | | −34,40 | 0,86 | −0,30 |
| Noril polifenil éter | | −31,82 | 0,86 | −0,28 |
| Poli (sulfuro de fenileno) | PPS | −31,82 | 0,86 | −0,28 |
| Piel de cerdo (lisa) | | −30,10 | 0,86 | −0,27 |
| Polipropileno | PP | −27,23 | 1.31 | −0,24 |
| Nailon resbaladizo 66 | | −26.09 | 0,50 | −0,23 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Caucho santopreno resistente a la intemperie y a los productos químicos | −25,23 | 0,50 | −0,22 |
| Caucho aflas resistente a productos químicos y al vapor | −22,65 | 1.31 | −0,20 |
| Polisulfona | −18,92 | 0,86 | −0,17 |
| Nailon fundido 6 | −18,35 | 0,99 | −0,16 |
| Copia el papel | −18,35 | 0,50 | −0,16 |
| Caucho de fluorosilicona resistente a productos químicos | −18.06 | 0,86 | −0,16 |
| Resina acetálica Delrin® | −14,91 | 0,50 | −0,13 |
| Madera (contrachapado de calidad marina) | −14.05 | 0,99 | −0,12 |
| Garolita resbaladiza resistente al desgaste | −11,47 | 0,50 | −0,10 |
| Caucho natural súper elástico y resistente a la abrasión. | −10,61 | 0,50 | −0,09 |
| Caucho buna-N resistente al aceite | 2.49 | 0,23 | 0,02 |
| Caucho buna-N/vinílico resistente al aceite de calidad alimentaria | 2,95 | 0,13 | 0,03 |

La serie triboeléctrica no es totalmente reproducible, y diversos exámenes conducen a diversas solicitudes de materiales; estas variedades se deben presumiblemente a pequeños contrastes en el material, el clima o el método de estimación [21].

## 2.3 Materiales triboeléctricos

El material triboeléctrico, es utilizado para la producción de energía triboeléctrica, a partir del efecto triboeléctrico. Un gran nivel de materiales que comúnmente encontramos a nuestro entorno ya sea madera, metal, polímeros, etc., es utilizado como material para la triboelectrificación. En la parte superior, como se ilustra la Fig.3, se ubican los elementos que presentan mayor nivel carga eléctrica positiva, en cambio los materiales que se localizan en la parte inferior son los que mantienen una mayor cantidad de carga negativa, en cambio los materiales de la mitad de la serie mantienen una polaridad de carga neutra [22] .

La eficiencia de un generador triboeléctrico se basa en la medida de los elementos o materiales a utilizarse, la amplia gama de fuentes de materiales ayuda a utilizar la recolección de múltiples energías y las hibridaciones [23]. El primer TENG de base, cuya configuración se basa en el diseño de contacto de materiales, es hasta ahora la razón de

ser de la gran mayoría de los artilugios actuales, constaba de una película de poliéster (PET) y una película de poliimida (KAPTON) con los terminales traseros cubiertos [23].

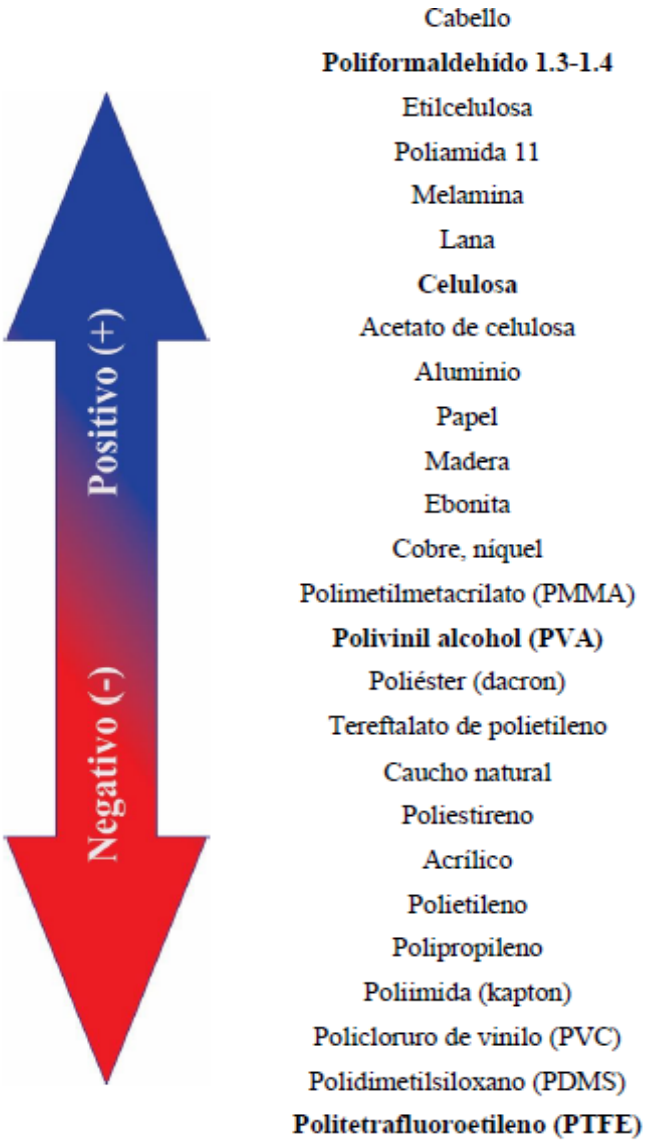



**Fig. 3.** Materiales triboeléctricos [22]

En principio, cualquier material con distinta afinidad de carga se puede utilizar para construir un TENG, dando como respuesta una extensa selección de materiales, en extremos opuestos de la serie triboeléctrica capaces de ofrecer un alto rendimiento. En la actualidad, existen una extensa diversidad de materiales que se utilizan en diversos ámbitos de estudio [23].

Los materiales se agrupan de varias formas en función de su uso, estructuras, aplicaciones, inicios o propiedades, para mostrar una mejor visualización del universo de los materiales. Los materiales triboeléctricos incluyen polímeros, metales, materiales

naturales, cristalinos, piezoeléctricos, de carbono y materiales 2D (láminas finas de átomos) [24].

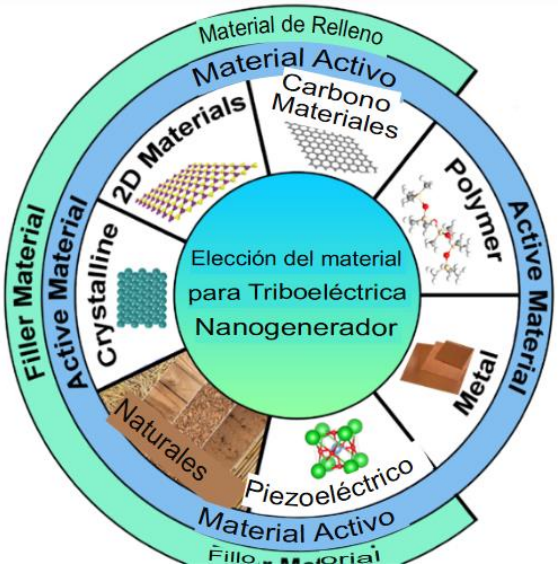



**Fig. 4.** Elección materiales triboeléctricos [24]

### 2.3.1 Polímero sintético

La palabra polímero proviene del término griego “poly”, su significado en español se refiere a muchos y “meros” cuyo significado es parte. Es decir, un polímero es una molécula gigante, muchas veces llamada macromolécula, que está formada por una gran cantidad de unidades que se repiten en toda la estructura [25].

Este grupo reúnen un enorme número de materiales que necesitan pasar por una interacción de creación, por ejemplo, están hechos por el control de varios individuos o personas. Este tipo de materiales que podemos encontrar en nuestro entorno, son el vidrio, el papel, el plástico y el cemento, estos materiales también se son llamados materiales artificiales.

- **Materiales sintéticos**

Los polímeros sintéticos con mayor índice de uso están entre ellos el politetrafluoroetileno (PTFE) y la silicona son materiales utilizados habitualmente para lograr cargas triboeléctricas negativas netas, mientras que el nailon y el metal son materiales para cargas positivas netas. La mayoría de los TENG actuales están basados en polímeros y son adaptables, fáciles de producir y profundamente compactos.

La poliimida (PI) es una especie de polímero (termoplástico), caracterizado por la existencia de imida (-CO-NH-CO-) en la cadena principal, tiene una excelente estabilidad al calor, resistencia química, resistencia mecánica. Para mantener su rendimiento bajo condiciones. una variedad de condiciones ambientales [26] . El PI se utiliza comúnmente como material triboeléctrico negativo autorreparable en TENG para la recolección de energía y la detección de movimiento; sin embargo, mejorar el rendimiento triboeléctrico del PI sigue siendo un desafío importante.

Además, que en diversos estudios han establecido otros polímeros triboeléctricos reportados como lo son: etileno propileno fluorado (FEP), Kaptón, politetrafluoroetileno (PTFE), tereftalato de polietileno (PET), alcohol polivinílico (PVA), cloruro de polivinilo (PVC), ácido poliláctico (PLA), nailon, polipropileno (PP), polimetilmetacrilato (PMMA) [24].

### 2.3.2 Biopolímero

El término generalmente se refiere a materiales en lo cual se producen total o parcialmente a partir de recursos renovables, como árboles, plantas y microorganismos [27]. Estos materiales son proporcionados por la naturaleza sin ningún tipo de modificación y entran en esta categoría. Los materiales naturales se dividen en materiales de origen: animal, vegetal y mineral. Entre las fuentes animales podemos mencionar, por ejemplo, el cuero y la lana. Entre las fuentes vegetales podemos mencionar aquellas sustancias que se pueden obtener de las plantas, como la madera y algunas fibras utilizadas. Por último, los materiales derivados de minerales son aquellos que se pueden obtener a partir de minerales, como los materiales metálicos y los materiales cerámicos [28].

Los materiales naturales son una clase única de materiales que son aptos para usos triboeléctricos. Esta clase es completamente biocompatible y respetuosa con el medio ambiente y puede reciclarse sin problemas. Debido a que su fabricación no es complicada ni costosa y su rendimiento es similar al de los materiales poliméricos y cerámicos tradicionales, estos materiales abren una nueva posibilidad de captación de energía eléctrica [11]. La celulosa consta como el polímero natural más extendido en zona terrestre, abarca 180.000 millones de toneladas creadas cada año [29].

La madera, el algodón, el cáñamo, el lino y otras fibras son ejemplos de fibras de celulosa naturales. La celulosa natural se ha utilizado durante muchos siglos debido a su abundancia, renovabilidad, biodegradabilidad respetuosa con el medio ambiente y otros beneficios. Sin embargo, debido a su baja solubilidad, la celulosa natural no puede fundirse y procesarse como los polímeros convencionales, lo que resulta en una escasa procesabilidad y limita su uso en tecnologías avanzadas [29].

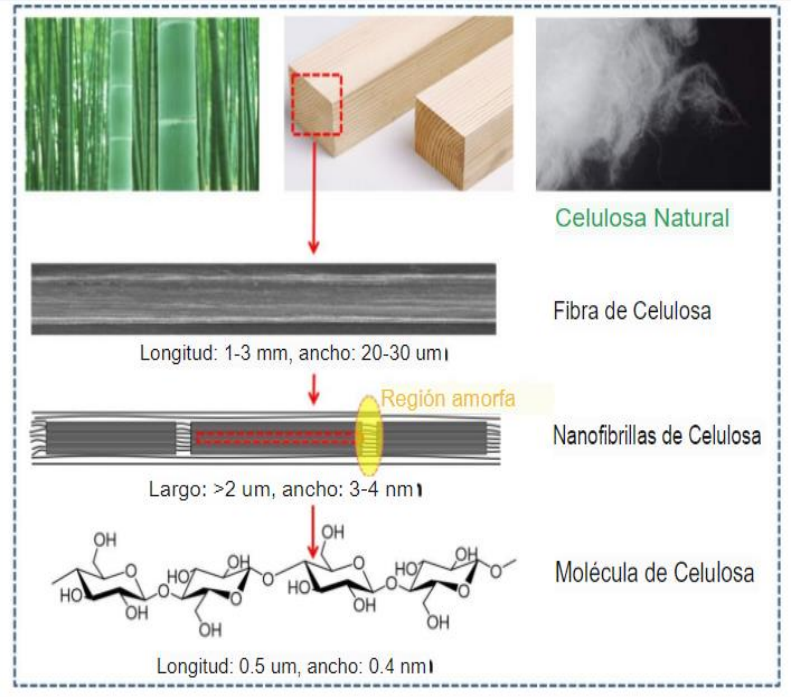



**Fig. 5.** Materiales celulósicos [29]

- **Materiales biodegradables naturales**

El primer nanogenerador triboeléctrico biodegradable (BD-TENG) se creó en 2016 con el objetivo de convertir la energía biomecánica a corto plazo en un proceso in vivo [11]. En una investigación exhaustiva de la "serie triboeléctrica" de cinco materiales naturales biorreabsorbibles, probando combinaciones por pares. Esto impulsó significativamente el desarrollo de materiales naturales para TENG y otros dispositivos triboeléctricos. [11] Algunos productos naturales como quitina, celulosa, fibroína de seda (SF), papel de arroz (RP) y clara de huevo (EW) son los componentes que pueden ser tomados en cuenta para la fabricación de un captador de energía triboeléctrica. La quitina puede extraerse de caparazones de cangrejos y gambas; la celulosa puede prepararse a

partir de madera y algodón; y el RP suele obtenerse del trigo, el maíz y el arroz. y SF se puede obtener de capullos y huevos, respectivamente.

Se presentó una propuesta para un nanogenerador triboeléctrico biodegradable basado en papel de arroz (RP-TENG), que funciona con un solo electrodo. El papel de arroz y la tinta conductora transparente se utilizaron como pares triboeléctricos y electrodos conductores [11] .El experimento realizado con este tipo de materiales se obtuvieron resultados obtenidos de circuito abierto con valor de 244V y corto circuito con valor de 6uA y una densidad de potencia de salida de 37.64 uW cm-2.

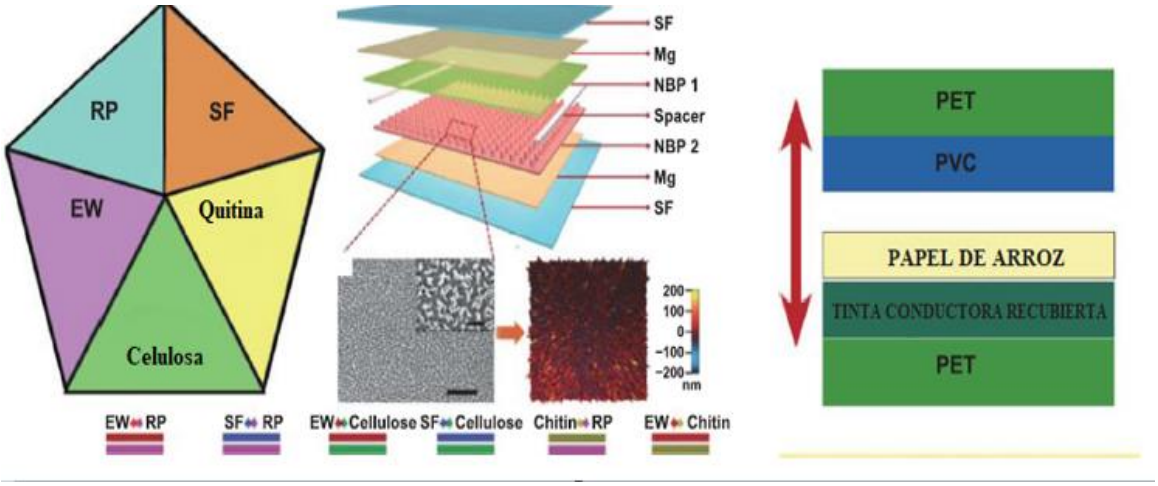



**Fig. 6.** Materiales biodegradables [11]

### 2.3.3 Polímero semisintético

Este tipo de materiales consiste en elementos o materiales semielaborados es polímeros consiste en que se adquieren por cambio sintético de biopolímeros sin diferir mucho de su naturaleza subatómica. Una parte de estos polímeros semielaborados son: nitrocelulosa, ebonita. Los polímeros naturales se transforman para producirlos, por ejemplo, el caucho vulcanizado y la nitrocelulosa. [30].

### 2.3.4 Polímero termoplástico

El término termoplástico, procede del griego «botella» y «plastos», que significan intensidad, calor y flexible, maleable, respectivamente. Cuando los termoplásticos se exponen al calor, sus poderes intermoleculares disminuyen, lo que los convierte en

materiales flexibles, estos compuestos son reciclables, reutilizable son algunas de las ventajas de este tipo de polímeros [31].

| Grupo termoplásticos | Prestaciones | Familias |
|---|---|---|
| **Commodities** | Prestaciones que responden a condiciones de ejercicio de no mucha responsabilidad y aceptables en un amplísimo espectro de aplicaciones. En general, son muy fáciles de transformar a temperaturas relativamente bajas. | PVC<br>LD-PE<br>HD-PE<br>PP<br>PS |
| **Commodities con mayores prestaciones** | Prestaciones algo superiores respecto a los commodities o de particular interés para aplicaciones en las que una sola propiedad específica hace favorable su utilización. | ABS<br>PMMA<br>SAN<br>Celulósicos |
| **Plásticos técnicos** | Cualidades mecánicas satisfactorias incluso a temperaturas elevadas. Su transformación es compleja. | PA<br>PET<br>PBT<br>PC<br>PTFE<br>POM<br>PPO |
| **Plásticos de altas prestaciones** | Elevadas prestaciones mecánicas y térmicas. Transformación muy compleja. Campo de aplicación similar a materiales compuestos, de los que en muchas ocasiones constituyen la matriz. | PI<br>PEK<br>PEEK<br>LCP (polímeros de cristal líquido)<br>PAI |

**Fig. 7.** Polímeros termoplásticos. [31]

## 2.4 Generador triboeléctrico

El generador triboeléctrico es un instrumento, que genera energía eléctrica electrostática, a través de dos materiales que entran en contacto e intercambian cargas eléctricas. Los tipos de generadores más populares en el proceso de generar energía eléctrica teniendo como base la triboelectricidad son la máquina Wimshurt, además del generador de nombre Van de Graaff, diseñados en los 1880 y 1929 respectivamente [22].

- **Nano generador triboeléctrico**

El grupo de investigación ZL Wang en el año 2012, desarrollaron un generador flexible que utiliza la técnica de la triboelectricidad para reunir energía mecánica, el generador triboeléctrico creado está conformado por polímeros.

Se apilan dos finas películas de polímero KAPTON y poliéster (PET) como se muestra en la Fig.8, donde la película de polímero puede deformarse mecánicamente para llevar a cabo un proceso de generación, separación e inducción, obtenido un voltaje de salida de 3.3 V [18].

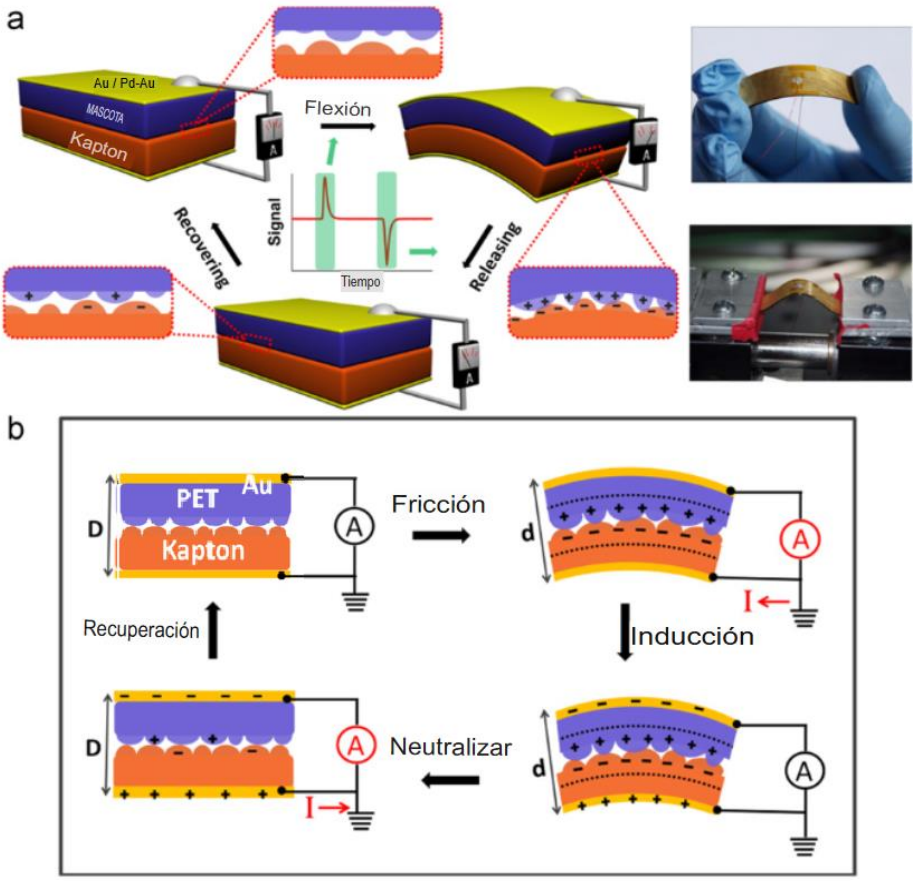



**Fig. 8.** TENG PET-KAPTON. (a) Estructura TENG. (b) Mecanismo TENG. [18]

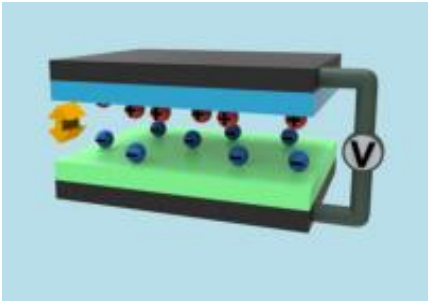
Los TENG tienen muchas ventajas, incluido un voltaje de salida extremadamente alto, eficiencia, bajo costo, versatilidad, diseño estructural y fabricación simples, estabilidad y robustez, y respeto al medio ambiente [32]. Tienen como base en la electricidad estática que se genera estableciendo contacto, fricción, rozamiento entre dos materiales y luego separando materiales dieléctricos [33].

La recolección de energía mecánica ambiental es una tecnología clave para realizar dispositivos electrónicos autoalimentados y tiene enormes aplicaciones en redes de sensores inalámbricos, dispositivos implantables, dispositivos electrónicos portátiles, etc. [34]. El TENG se basa en la conjunción de triboelectrificación e inducción electrostática,

y utiliza los materiales más comunes disponibles en nuestra vida diaria, como papeles, telas, PTFE, PET, KAPTON, PDMS, Al, PVC, etc.

Se puede utilizar como recolector de energía mecánica (energía mecánica como vibración, energía producida por olas del océano y energía biomecánica), además de que sirve de alimentación de energía para algunos dispositivos electrónicos [35]. A continuación, se puede observar aspectos muy importantes como se muestra la tabla 4.

**TABLA 4.** Especificaciones nano generador triboeléctrico. [17]

| | **Nano generador triboeléctrico** |
|---|---|
| **Estructura Dispositivo** |  |
| **Fuente de energía** | - Presión/ Vibración /Rotación / Deslizamiento |
| **Materiales** | - Material-positivo: piel humana, nylon etc.<br>- Material negativo: PTFE, PVC, PFA, PDMS, etc |
| **Características** | - Eficiencia: 30 - 60%<br>- Potencia Generada: uW-1W<br>- Voltaje de Salida: >kV<br>- Circunstancia: Vibración mecánica, acción humana |

La energía disponible en nuestro entorno diario, la energía mecánica está ampliamente distribuida, donde además consiste en una fuente de energía más numerosa,

lo que la convierte en una buena fuente de energía. Impulsando los sistemas inteligentes autónomos del futuro [32]. Se han desarrollado varias tecnologías para aprovechar la energía mecánica. En el trabajo de investigación de Min et al. [36], nos muestra el desarrollo de un nanogenerador triboeléctrico de modo contacto de separación vertical, se ha utilizado materiales como sustrato de vidrio/ITO, cobre, PET, como se ilustra en la Fig.9.

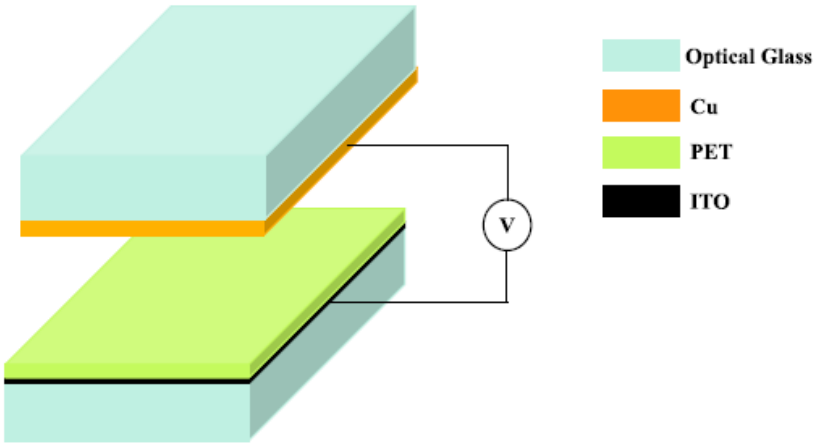



**Fig. 9.** Esquema TENG, modo contacto. [36]

- **Modos generador triboeléctrico**

Dependiendo de la dirección del cambio de polarización y la configuración de los electrodos, se han propuesto cuatro modos de operación diferentes del TENG desde su primer informe en 2012 [23]. Los modos de operación de un generador triboeléctrico son fundamentales. Donde su implementación de este dispositivo puede aprovechar diferentes modos de funcionamiento, para maximizar su eficiencia y aplicabilidad [37], [38].

Las constantes investigaciones de este nueva producción de energía eléctrica a partir del generador, los investigadores han desarrollado y refinado los modos operativos principales de un TENG, donde se derivan en cuatro modos de funcionamiento [39].

Al combinar y optimizar estos modos de operación, se pueden diseñar un TENG más eficientes y adaptados a diferentes aplicaciones, desde la captación de energía en el ambiente, hasta la generación de energía en dispositivos portátiles, los principales métodos o modos antes mencionado de un generador triboeléctrico [38].

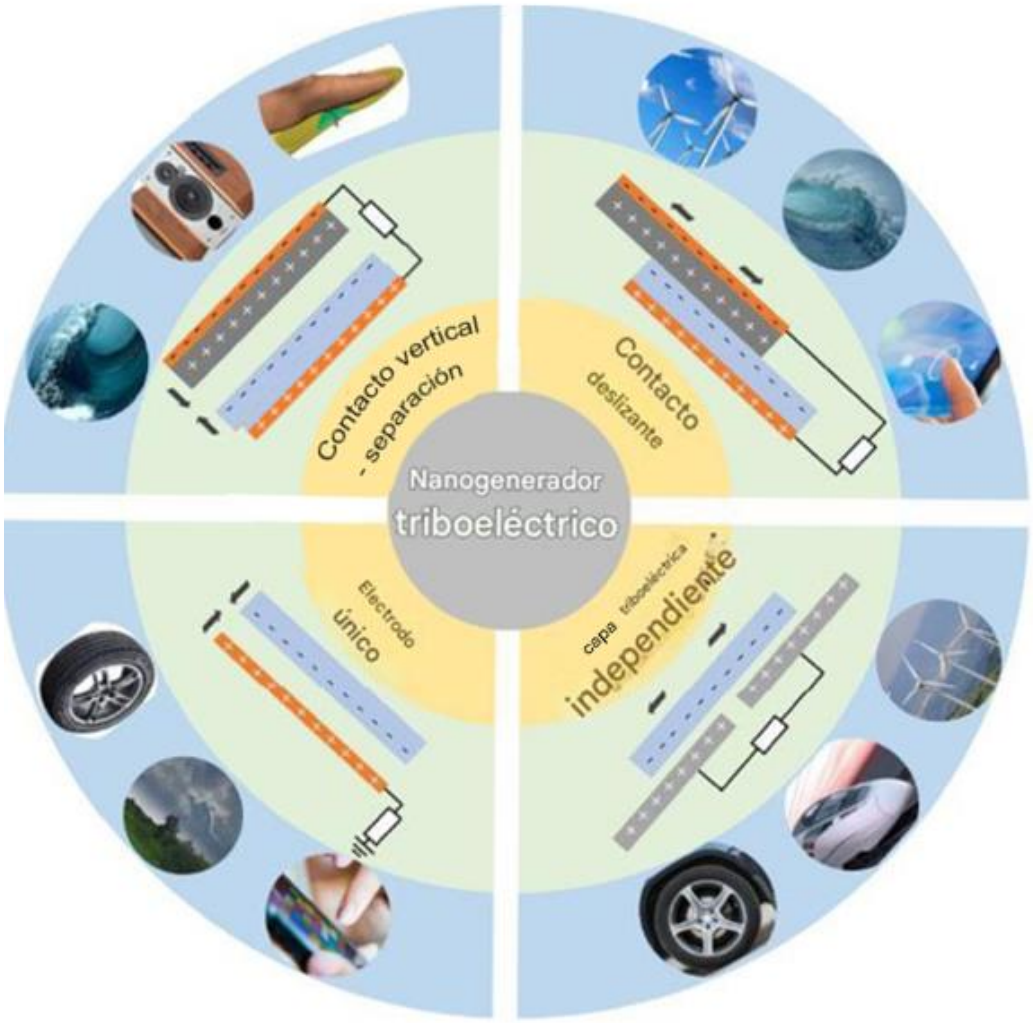



**Fig. 10.** Modos de operación TENG: modo separación vertical, modo deslizamiento lateral, modo de electrodo único, modo capa independente. [39]

### 2.4.1 Modo contacto-separación vertical

Consiste en dos capas de láminas dieléctricas, establecidas a una rango de distancia, en los cuales los electrodos se depositan en la superficie superior e inferior respectivamente del material dieléctrico, como se muestra en la Fig. 11.

Este método implica una separación de las películas dieléctricas, anteriormente en un estado contacto físico, al separarse las superficies del material dieléctrico se cargan eléctricamente de manera opuesta, cuando las dos superficies se separan debido a la acción de una fuerza mecánica.

El espacio entre los electrodos, la corriente fluye debido a la inducción electrostática. [40]. La caída de potencial es un efecto natural que se presenta cuando la energía almacenada en el generador se transfiere a un circuito externo [22].

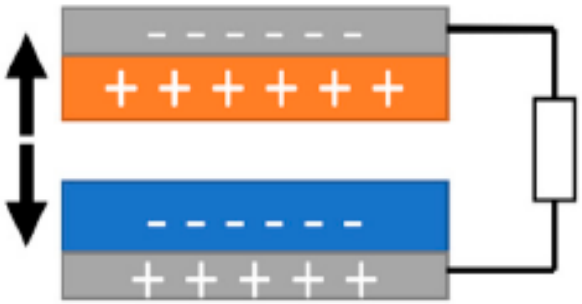


**Fig. 11.** Modo contacto vertical. [40]

Como se indican los materiales de las coincidencias triboeléctricas, el generador triboeléctrico de modo de contacto vertical se clasifica esencialmente en dos tipos: dieléctrico con dieléctrico y conductor-dieléctrico [22]. El modelo construido para un TENG nos demuestra la Fig. 12a es el modo de placa ubicada de forma paralela, electrodo realizado la conexión de la manera capa dieléctrica a otra lámina dieléctrica.

La Fig.12b, hace referencia el TENG en modo de contacto de forma paralela de que el electrodo adjuntado de conductor a capa dieléctrica. Mientras que en la Fig. 12c, es el diagrama del circuito equivalente, en modo de contacto de plancha equidistante de electrodo conectado de conductor a una capa dieléctrica [41].

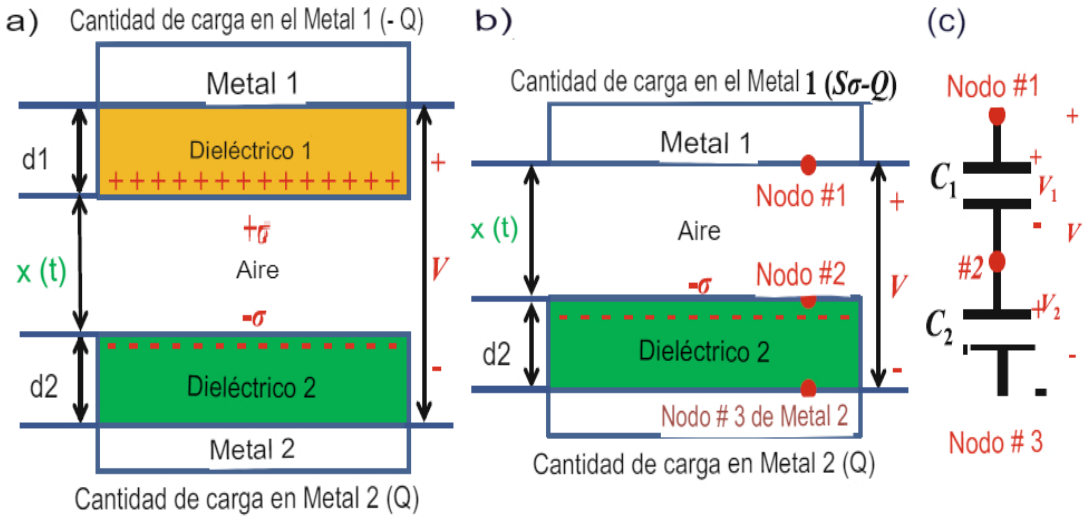



**Fig. 12.** Modelos teóricos. (a) TENG en modo de contacto dieléctrico-dieléctrico. (b) TENG modo contacto conductor-dieléctrico. (c) Circuito equivalente para placa paralela de electrodo unido de conductor a dieléctrico TENG. [41]

- **TENG modo contacto dieléctrico – dieléctrico**

Como se muestra en la Fig.12a), los 2 materiales dieléctricos con espesores $d_1$ y $d_2$ y constantes dieléctricas ($\varepsilon_{r1}$, $\varepsilon_{r2}$), se agrupan frente a frente, para formar dos laminas triboeléctricas [41]. Sobre las superficies exteriores de estos dos dieléctricos se depositan dos materiales metálicos (electrodos). La distancia (x(t)), entre las 2 planchas triboeléctricas varía bajo agitación mediante fuerza mecánica externa. Posteriormente al entrar en contacto entre estas, la superficie interna de los materiales triboeléctricos respectivamente se obtiene energía electrostáticas con cargas eléctricas contrarias (cargas triboeléctricas) de igual densidad, debido al contacto eléctrico [41].

En el momento en que las 2 capas del material triboeléctrico empiezan a aislarse entre estas, con **(x)** ampliado, se incitará una posible distinción (**V)** entre el material conductor, como los dos electrodos. El número de cargas transportadas entre los electrodos, que fueron impulsadas por el potencial inducido, se caracteriza como **(Q)** [22], [41].

- **TENG modo contacto conductor – dieléctrico**

Para el modo de TENG por contacto de conductor - dieléctrico su construcción es de manera similar al tipo o modo TENG por contacto dieléctrico-dieléctrico. En esta estructura ya no se dispondrá el Dieléctrico 1, como se puede observar en la Fig. 12b, por lo tanto, el metal número 1, tendrá dos funciones, como carga triboeléctrica, en la posición superior y también tendrá la función de ser el electrodo superior [22]. De esta manera la carga total en el conductor (metal 1), se compone de dos partes: una sola carga triboeléctrica ($S.\sigma$), mientras que las cargas que se transportan entre los dos electrodos ($Q$), están representadas por la otra parte. En consecuencia, la carga total que se encuentra en el metal 1, es representada de ($S\sigma - Q$) [22] , [41].

Como se ha indicado anteriormente, la relación entre los tres factores sirve como ecuación teórica para la generación de energía del TENG. Voltaje entre 2 electrodos (V), además en la cantidad de carga que se transmitió en el medio (Q), además en la separación (x) a una distancia establecida. Esto permite la derivación electrodinámica de la relación V-Q-x del TENG de modo contacto vertical [41]. Dado que el tamaño de los metales, referente a su área (S) tiende a una magnitud mayor que su distancia de separación indicada de la siguiente manera ($d_1 + d_2 + x$) en la situación experimental, por lo que es razonable suponer que los dos electrodos son infinitos.

Bajo esta suposición, la carga del electrodo metálico se distribuirá uniformemente en las superficies internas de ambos metales [41]. Con valores positivos orientados, a la ubicación del metal, en lo cual el campo eléctrico, consta de una componente perpendicular a la dirección de la superficie cuando se tienen en cuenta el dieléctrico y el entrehierro [41].

### 2.4.2 Modo deslizamiento lineal

En este método o modo, consta de dos películas dieléctricas tienen un deslizamiento. El contacto físico entre las capas dieléctricas debido al rozamiento crea una carga triboeléctrica opuesta en las dos superficies de los materiales dieléctricos, debido al deslizamiento relativo paralelo a la interfaz [42].

El electrodo se ubica en la parte superior e inferior, como se ilustra en la Fig13. equilibran el campo eléctrico. La estructura básica del modo de deslizamiento lateral es similar al modo de contacto vertical, el modo deslizante se puede aplicar al movimiento plano o rotatorio de un disco o cilindro. Recientemente, los nano generadores triboeléctricos de modelo deslizante (SLTENG) demostraron ser una solución extremadamente poderosa, barata y confiable para la generación de electricidad [43].

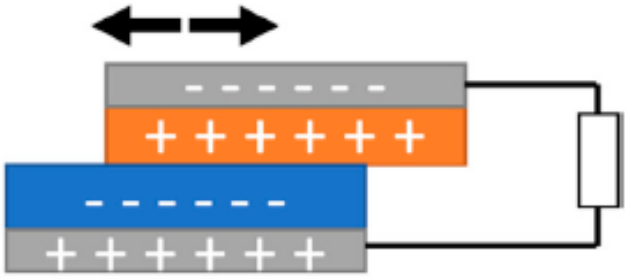


**Fig. 13.** Modo deslizamiento lateral. [40]

### 2.4.3 Modo electrodo único

En comparación con los otros modos, la estructura del dispositivo es más sencilla en el diseño del modo TENG de electrodo único, el electrodo de la capa dieléctrica activa está conectado a tierra [24]. Otra lámina dieléctrica es una capa que puede moverse

libremente para inducir la electrificación de los contactos por rotación o traslación o para separar los contactos [44].

.

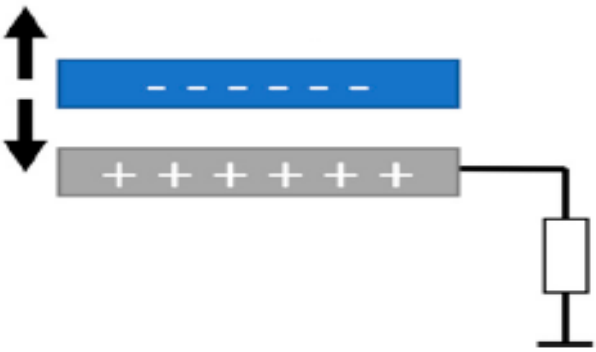


**Fig. 14.** Modo electrodo simple. [40]

### 2.4.4 Modo capa triboeléctrica-independiente

Este modo consiste en el par de electrodos de igual simetría, además de una capa dieléctrica, los electrodos están ubicados debajo de la capa dieléctrica, la distancia es similar entre ellos, como se muestra en la Fig15. Cuando se desplaza más cerca o más lejos, se genera energía.

El dispositivo no requiere movimiento ni contacto directo con la lámina del material dieléctrico superior de los electrodo, el desgaste de la superficie disminuye significativamente el estado de giro libre sin contacto mecánico directo.

La distancia entre dos electrodos es el factor estructural más crucial en este modo, ya que afecta directamente al desplazamiento de deslizamiento necesario para generar un ciclo completo de energía.[45].

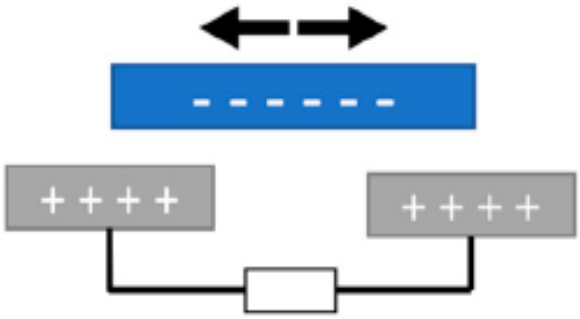


**Fig. 15.** Modo independiente capa triboeléctrica. [40]

- **Mejora rendimiento generador triboeléctrico**

El rendimiento de salida, la sensibilidad y la estabilidad de un generador triboeléctrico dependen de factores como la constante dieléctrica, la morfología de la superficie, las propiedades mecánicas, la densidad de carga, el potencial de superficie y la elección de los materiales en la serie triboeléctrica [46]. Por ejemplo, Battha et al. [47], informaron de un generador triboeléctrico compuesto a base de los materiales de nanofibras de fluoruro de polivinilideno (PVDF), fusionada con MXene (láminas de carburo de titanio), donde se obtuvieron notables mejoras en el rendimiento del generador con un potencia de salida de 4,6 mW.

Por otro lado, para el mejoramiento de un generador triboeléctrico de celulosa, se tiene algunos procesos que incorporan en la modificación cambios químicos y físicos. El trabajo realizado por Mekbutoon al. [48]. diseñaron un TENG, utilizando celulosa combinado con carbón activo además de caucho natural, obteniendo un voltaje de 137V y y una corriente 12 uA, el generador triboeléctrico a base de celulosa como componente principal y además con la adicción de varios materiales a la celulosa, se mejora considerablemente el rendimiento [48]. La nanoestructura de la celulosa se puede modificar para aumentar la zona de la región superficial, así como en la modulación dieléctrica con la adición de Magnetita [49],así como en materiales dieléctricos y funcionalización en el campo de la química.

Se han realizado algunos trabajos de investigación donde se utiliza residuos agrícolas, donde se utiliza el material orgánico como la celulosa. Debido a su rico contenido de átomos de oxígeno, la celulosa manifiesta características fisicoquímicas distintivas que promueven el desprendimiento de electrones. Por lo tanto, la celulosa se elige a menudo como el material de fricción positiva. En el trabajo de investigación realizado por Yao et al. [50], nos informan de un generador triboeléctrico conformado por nanofibras de celulosa (CNF) como material, tribopositivo y además que sea utilizado como material tribonegativo FEP (etileno de propileno fluorado). El rendimiento de salida de voltaje del circuito abierto del generador triboeléctrico alcanzo los 30 V, mientras que la corriente de cortocircuito nos indica un resultado de 90 μA.

El uso de la celulosa en la construcción de un generador triboeléctrico amigable con el medio ambiente es una nueva forma de utilizar materiales de residuales. Un generador triboeléctrico conformado por biopolímeros (BP-TENG). Los biopolímeros han surgido

como elementos clave en la construcción de nanogeneradores triboeléctricos (TENG) debido a sus fuentes renovables y su excelente biodegradabilidad [51].

### 2.4.5 Aplicaciones

La divulgación del nanogenerador triboeléctrico (TENG) es un logro significativo en el campo del cambio de energía mecánica en potencia para el desarrollo de estructuras autocontroladas. Ofrece una visión del mundo completamente nueva para aprovechar con éxito la energía mecánica utilizando realmente materiales naturales y en materiales naturales. TENG no sólo puede actuar como un punto de acceso de energía a microescala para aparatos electrónicos versátiles y compactos, sino que también puede utilizarse como un punto de acceso de energía para aparatos electrónicos versátiles y convenientes, y además puede recoger energía hídrica del mar y del viento, abriendo otro campo de energía azul, que es otra sección más allá de la energía eficiente [35].

Para dar una correlación, EMG (generador electromagnético) y TENG (nano generador triboeléctrico), a través del cual las distinciones entre TENG y EMG deben ser visibles. [52] Los principales usos del TENG se encuentran en tres epígrafes, como fuente de energía nano/micro energía de apoyo para que los pequeños aparatos logren la autoalimentación; como sensores dinámicos para monitoreo medical, la fundación, la seguridad humana-máquina, ecológica. A medida que se crean aplicaciones TENG, crece también el número de dispositivos TENG diferentes [53].

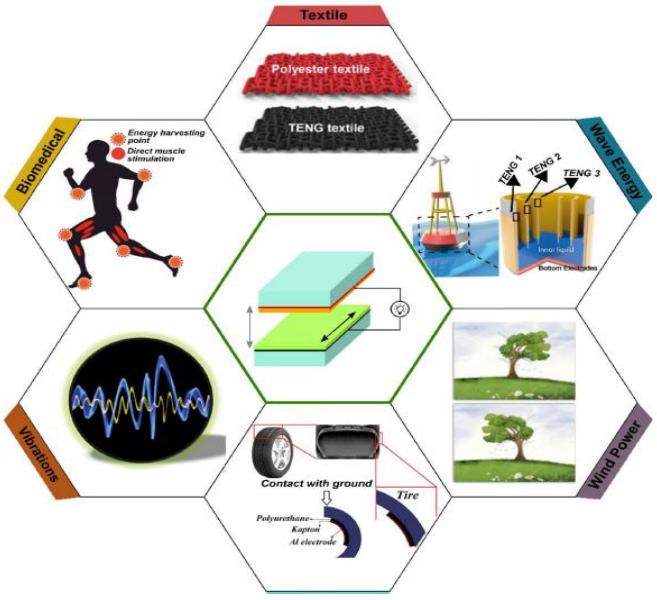



**Fig. 16.** Diagrama aplicaciones TENG. [52]

# CAPÍTULO III

# MÉTODOS Y MATERIALES

Este capítulo se describe acerca de los métodos y materiales empleados en el diseño de un generador triboeléctrico utilizando materiales residuales, para la generación de electricidad, donde se detalla el procedimiento de la metodología seguida, la selección de materiales y posteriormente el diseño del dispositivo.

## 3.1 Métodos

En el desarrollo del presente proyecto, se trataron diversos métodos que se indican a continuación. Como punto inicial, el primer método utilizado abarca el método documental, donde se recopilo de la información fundamental, con respecto a la triboelectrificación o el efecto triboeléctrico, donde se revisaron estudios previos relacionados con el uso de materiales en la triboelectrificación. Además del principio de funcionamiento de un generador triboeléctrico, por ende, al usar este método se obtuvo una información más amplia, acerca de los campos de estudio a investigar.

Seguidamente se utilizó el método descriptivo, este método nos brinda una compresión más profunda y sumamente más detallada acerca de la composición de los materiales que conforman un generador triboeléctrico, donde se indica las características del material, en cuanto se refiere a la polaridad de carga eléctrica, debido a su afinidad electrónica, ordenada en una serie triboeléctrica, en ese apartado se distinguen los diferentes materiales ordenados respectivamente.

Posteriormente se utilizó el método comparativo, en este apartado se llevó a cabo la selección de los diferentes materiales, en lo cual permitió elegir materiales reciclados con propiedades triboeléctricas, donde consiste en comparar los materiales residuales, con la finalidad de optimizar el rendimiento del generador triboeléctrico. Se estableció en comparar los diferentes modos de operación de un generador triboeléctrico, en lo cual nos permitió diferenciar la estructura geométrica, tipos de contacto o fricción, de esta manera se detalló los aspectos que permiten la viabilidad y eficacia de su uso como una fuente en la generación energética.

## 3.2 Diseño de la investigación

El presente proyecto se enmarcó en una investigación de carácter experimental, en virtud del diseño de un generador triboeléctrico. Las variables están relacionadas con los materiales dieléctricos, a partir de materiales reciclados, el modo de operación de funcionamiento, velocidad de fricción, presión aplicada, conductores eléctricos (electrodos). Este enfoque demostró un análisis experimental, donde la electrificación por contacto entre materiales seleccionados es fundamental en la composición de un generador triboeléctrico, para la generación de energía eléctrica.

## 3.3 Metodología

La metodología empleada en este proyecto de investigación, se adoptó un enfoque secuencial, permitiendo abordar de manera estructurada las distintas etapas del trabajo de titulación. En este proceso, se definieron y organizaron las fases de desarrollo, asegurando una ejecución ordenada. Cada sección del estudio, detallada los procedimientos seguidos, como se ilustra en la Fig. 17.

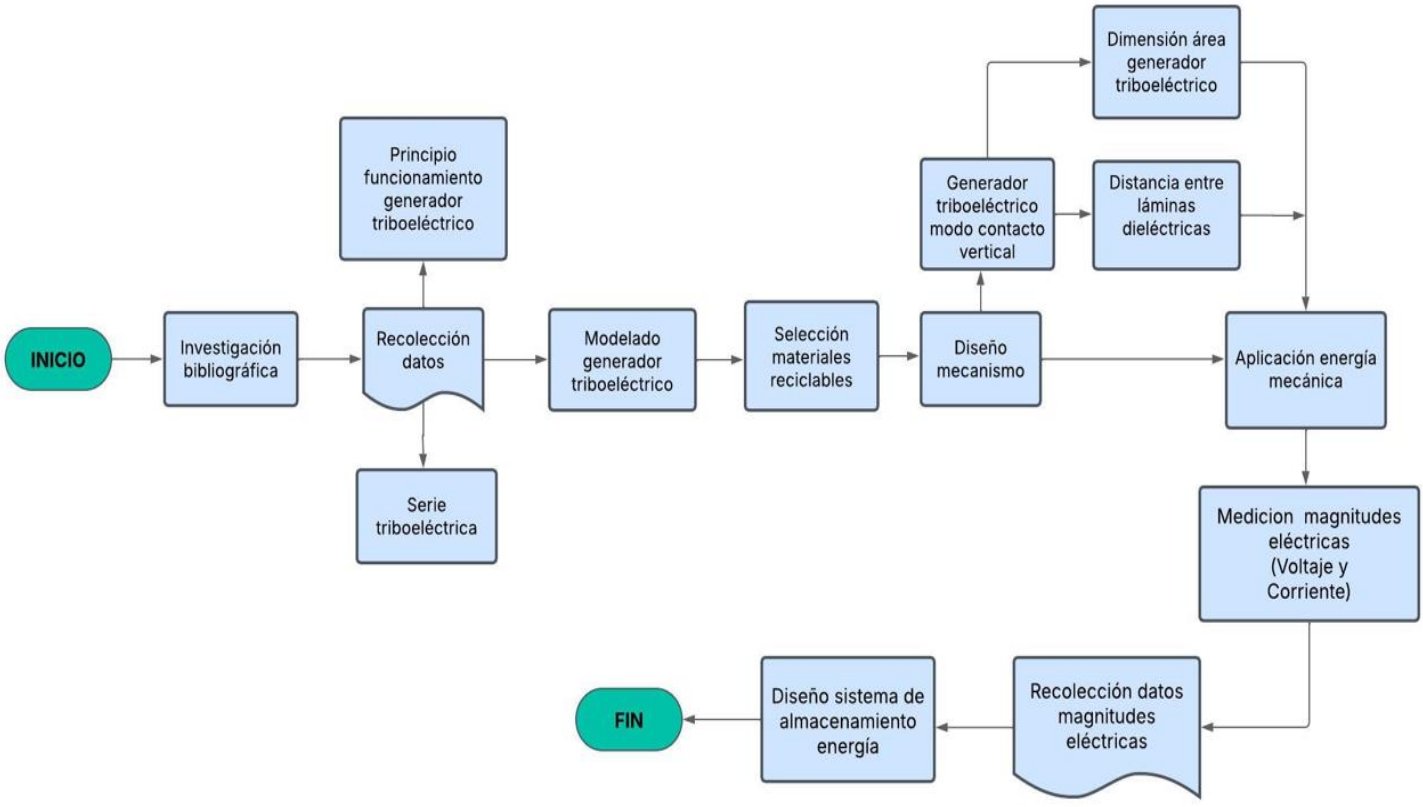



**Fig. 17.** Diagrama de flujo metodología

En primer lugar, se llevó a cabo la recopilación de información encontradas en las diferentes fuentes bibliográficas tales como SCOPUS y ScienceDirect, repositorio digital universitario de la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte, en revistas, artículos científicos y sitios web, para el desarrollo del marco teórico.

Se determino su principio de funcionamiento de un generador triboeléctrico, en el cual nos permitió establecer la fundamentación teórica acerca del proceso de su función acerca de su funcionamiento, se basa en la transformación de energía mecánica a energía eléctrica, por medio de la electrificación por contacto y la inducción electroestática

En el modelado de un generador triboeléctrico, se enfatizó en analizar los modos de funcionamiento de un generador triboeléctrico, de esta forma se obtienen los parámetros de diseño, como su configuración geométrica, materiales y demás componentes necesarios, para su diseño. Posteriormente, se realizó la selección de materiales adecuados para la construcción del generador, priorizando aquellos materiales obtenidos a partir de residuos locales, como el residuo orgánico conformado por el bagazo de caña y el polímero PET (Tereftalato de polietileno), estos materiales fueron seleccionados por su disponibilidad, bajo costo, accesibilidad en el caso del PET y en el uso de un material biodegradable como el bagazo de la caña de azúcar.

Una vez seleccionados los materiales triboeléctricos que conformaran el generador triboeléctrico, se procedió a la fase del diseño del mecanismo del generador triboeléctrico, donde se estableció diversas configuraciones, en el entorno de los materiales triboeléctricos utilizados, electrodos, tipo o modo de operación de funcionamiento, área del generador triboeléctrico, distancia entre las láminas dieléctricas.

Para el contacto de fricción entre los materiales del generador triboeléctrico, se utilizó un motor eléctrico lineal, este motor nos permitió aplicar una fuerza mecánica externa, de esta manera se consiguió obtener una presión y velocidad constante, muy importantes para generar energía eléctrica, en este tipo de generadores.

Se utilizaron técnicas de medición para medir las magnitudes eléctricas, generadas por el generador triboeléctrico, utilizando un multímetro digital, en lo cual se midió el voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito. Finalmente, se diseñó un sistema de almacenamiento de energía, donde la energía proveniente del generador triboeléctrico pueda ser aprovecha por dispositivos electrónicos de baja potencia.

## 3.4 Materiales para diseño generador triboeléctrico

En esta sección se detalla los materiales utilizados, para el diseño del generador triboeléctrico, como ya se ha mencionado con anterioridad, los materiales utilizados para el fabricación del dispositivo, son desechos residuales, como botellas plásticas compuestas por el material PET (Tereftalato de polietileno), residuos agrícolas naturales del bagazo de caña de azúcar.

Se decidió la elección de estos materiales, debido a las combinaciones específicas entre polímeros, biopolímeros, metales, basándose en la investigación realizada en la sección del marco teórico. La utilización de estos materiales contribuye al reciclaje, aportando con el medio ambiente. Las especificaciones de los materiales seleccionados, nos muestra en la tabla 5.

**TABLA 5.** Materiales para diseño generador triboeléctrico.

| Materiales | Especificaciones |
|---|---|
| **Bagazo caña de azúcar** | El bagazo de la caña de azúcar (Saccharum ofiinarum), consiste en un desecho agrícola. Este material incorpora celulosa a un porcentaje de (38,4%), hemicelulosa (23,2%) y lignina (25%) respectivamente [54]. Es un polímero natural (biopolímero), con una alta composición alta en celulosa, en la serie triboeléctrica, este material nos indica que su carga eléctrica es positiva, debido su afinidad electrónica de ceder electrones. |

**Botellas Plásticas**

Las botellas plásticas, es un recipiente comúnmente utilizado, su fabricación consta por el material de un polímero plástico que se utiliza comúnmente para almacenar líquidos como agua, refrescos, jugos. Muchos de los materiales más ordinarios utilizados para fabricar botellas plásticas constan el polímero termoplástico de tereftalato de polietileno PET [55]. Este material, debido a sus propiedades es un material triboeléctrico negativo, por su capacidad de ganar electrones. Las botellas plásticas, son muy comunes en nuestro entorno, facilitando el aprovechamiento y accesibilidad, apto para su utilización en el diseño de un generador triboeléctrico.

**Cinta de aluminio**

Este elemento, formado por el metal aluminio, posee cualidades que lo convierten en un buen material para una variable gama de utilización, donde su bajo peso específico, su alta ductilidad, su bajo coste de mecanizado y su alta conductividad eléctrica y térmica [56].

**PVC**

Este material, conformado de policloruro de vinilo (PVC), consiste en un polímero termoplástico, usado en muchas aplicaciones. Se obtiene a mediante la polimerización del monómero de cloruro [57]. Este tipo de material se encuentra ubicado en la parte muy inferior de la serie triboeléctrica, esto nos indica que es un material con carga eléctrica negativa, debido a la ganancia de electrones.

**Cables de conexión**

Los cables de conexión, comúnmente fabricados por finos cables de cobre, se utilizan para conectar aparatos de laboratorio, fuentes de alimentación, sensores y otros dispositivos [58] .

- **Síntesis fibra bagazo de caña de azúcar.**

Este material, es un residuo fibroso natural que se obtiene procedente de la extracción del zumo que se encuentra en los tallos de la caña., consiste en un material orgánico (biopolímero). Para separar la celulosa de otros componentes presentes en la fibra del bagazo de la caña de azúcar, se emplean métodos mecánicos o químicos Posteriormente, se realizó un blanqueamiento y purificación para mejorar sus propiedades. Seguidamente la fibra es secada, triturada y acondiciona para su uso final. Este proceso permite su aplicación en industrias como la fabricación de diferentes materiales.

Como primer paso, como se muestra en la Fig. 18a, se recolecta el residuo natural de la caña de azúcar, de una plantación agrícola dedicada a este tipo cultivos. El bagazo de la caña de azúcar se encuentra dentro de los tallos, estos residuos se consideran sustancias de origen natural. los componentes fibrosos de la pared celular vegetal están conformados por componentes de lignina, hemicelulosa y en mayor medida por celulosa [59].

Seguidamente, se ha seleccionado los tallos con la fibra de bagazo que se encuentran en mejores condiciones, una vez clasificado el material residual agrícola, se procedió a su desmenuzamiento manual de la fibra donde se obtuvo todo el material fibroso del tallo de la caña de azúcar, como se ilustra la Fig. 18b. Posteriormente se recolecto, toda el material en un recipiente plástico, como se muestra la Fig. 18c. Seguidamente una vez extraído el material de la fibroso se procedió a desmenuzar, además se procede a cortar en trozos más pequeños, luego se realiza la trituración de la fibra bagazo de caña de azúcar, para obtener una consistencia más fina y delgada. se procedió a tamizar la fibra molida y se obtiene un polvo más fino, como se ilustra en la Fig. 18d

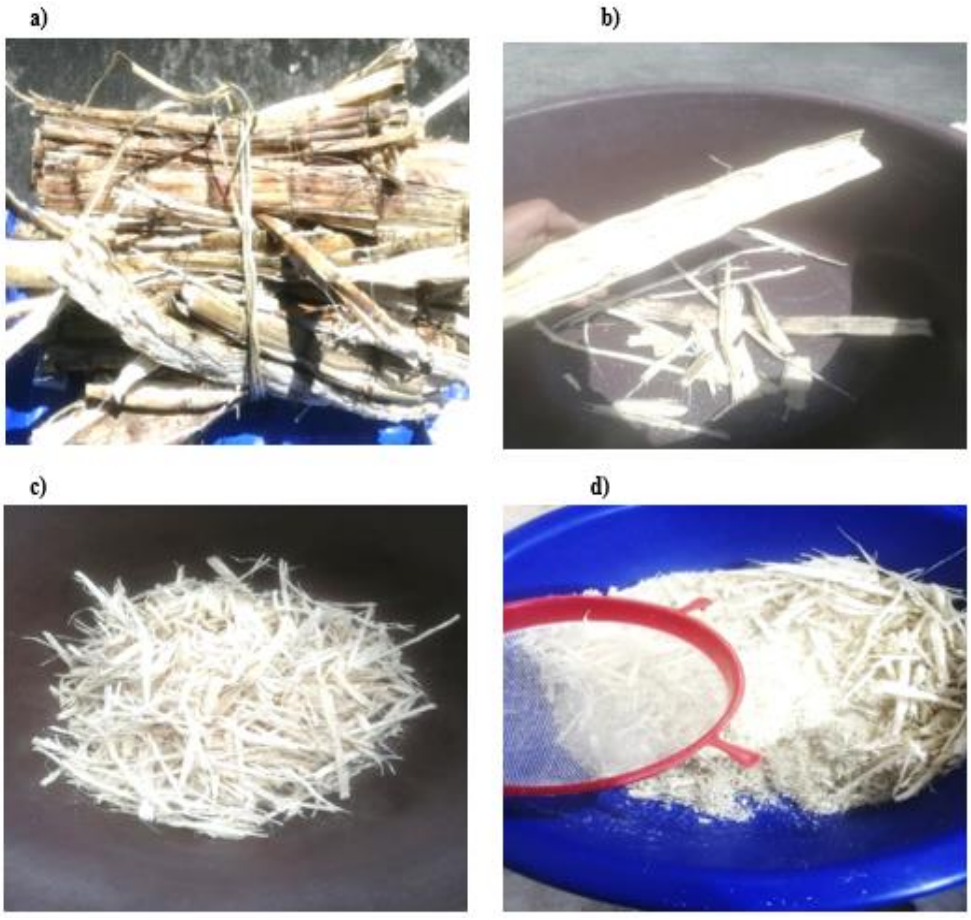



**Fig. 18.** Proceso extracción fibra de bagazo de caña de azúcar. (a) Residuo bagazo de caña de azúcar. (b) Desmenuzamiento fibra bagazo caña. (c) Recolección fibra bagazo de caña de azúcar. (d) Tamizado residuo de caña de azúcar.

- **Obtención celulosa, a partir del material fibroso (bagazo) molido.**

- **Materiales:** Bagazo de caña de azúcar, agua, triturador, bicarbonato de sodio, cernidor, pegamento, prensa manual, molde rectangulares.

El principio inicial del proceso consiste en la recolección de la materia prima, el bagazo es un residuo agrícola orgánico que es producto del desecho de la caña. La reutilización de los desechos orgánicos promueve la sostenibilidad ambiental, aportando con el cuidado del medio ambiente. Se indica el procedimiento para la obtención de la celulosa de la caña de azúcar, como se ilustra en la Fig. 19.

- **Diagrama de flujo procedimiento – Obtención celulosa a partir del residuo de la caña de azúcar**

**Fig. 19**. Diagrama de flujo. – Síntesis obtención celulosa, fibra bagazo

Como paso inicial, se procedió a la recolección en un recipiente plástico el polvo fino de la fibra de bagazo, como se ilustra en la Fig. 20a, el cual fue producto de una de trituración y además se procedió a tamizar. Una vez recolectado el material más delgado y fino del desecho natural, seguidamente se realiza el proceso cocción en un recipiente antioxidante, se agregó 50 gramos Hidróxido de sodio (NaOH) disuelto en 0,5 L de agua, posteriormente se agregó 200 gramos fibra, la cocción fue durante un tiempo de 2 horas, este proceso se realizó para eliminar la lignina y otro componentes presentes en la fibra.

Posteriormente se filtró y se consecuentemente se procedió a realizar el secado de las fibras a temperatura ambiente, como se ilustra en la Fig. 20b.

A continuación, la fibra de bagazo se mezcla hipoclorito de sodio con agua en un recipiente, para el proceso de blanqueamiento se agrega 100ml de hipoclorito por 250 gramos de fibra de bagazo por una hora, como se ilustra en la Fig.20c. Posteriormente se realizó el proceso de filtrado y secado. Finalmente, nuevamente se procedió a triturar la fibra resultante, obteniendo un material a base de celulosa como se muestra en la Fig20d.

**Fig. 20.** Proceso obtención celulosa a partir bagazo de caña de azúcar. (a) Recolección fibra bagazo de caña. (b) Dispersión y secado fibra bagazo. (c) Blanquimiento fibra. (d) Celulosa fibra de caña de azúcar.

- **Reciclaje botellas plásticas PET (Tereftalato de Polietileno)**

Como punto inicial, consiste en la realización del proceso de reciclaje de los recipientes (botellas de plástico), en la ciudad de Ibarra, Imbabura, Ecuador. Estos residuos plásticos están constituidos mayoritariamente por el material PET (Tereftalato de Polietileno), como se ilustra en la Fig. 21. El PET es un material liviano, tiene alta

resistencia a la compresión mecánica, gran transparencia y destello, retiene el sabor y fragancia de los alimentos, puede bloquear gases, es 100% reciclable y reutilizable[60].

Este polímero tipo plástico se puede identificar en su envase, debido a una numeración que se puede visualizar en su correspondiente recipiente. El símbolo del material PET en el recipiente plástico, consiste en el triángulo de Möbius, con la enumeración 1, impreso en la botella, este símbolo ayuda al reconocimiento de este. [61] El reciclado de botellas de plástico, contribuye a la reducción de deshechos reciclables en el medio ambiente al reducir los residuos no biodegradables.

**Fig. 21**. Envases botellas plásticas PET.

Una vez realizado el proceso de recolección de los envases, se constata que los recipientes seleccionados como las botellas plásticas que se encuentren en un estado óptimo, por ejemplo, en su contextura. Posteriormente se procede para limpiar rastros de impurezas en las botellas plásticas, en su parte interna y externa de esta.

Seguidamente se procedió a lavar con agua destilada y a continuación se realizó el secado del envase en el medio ambiente. De esta forma, las botellas están a disposición para su respectivo uso o procesos a realizar. Se utiliza cualquier tipo de envase en cuanto se refiere al tamaño, color, forma, siempre y cuando el material que constituye el envase sea compuesto por el material PET. El proceso del reciclaje de botellas plásticas sigue diferentes fases, como se ilustra en la Fig. 22.

- **Diagrama de Flujo - Reciclaje botellas plásticas**

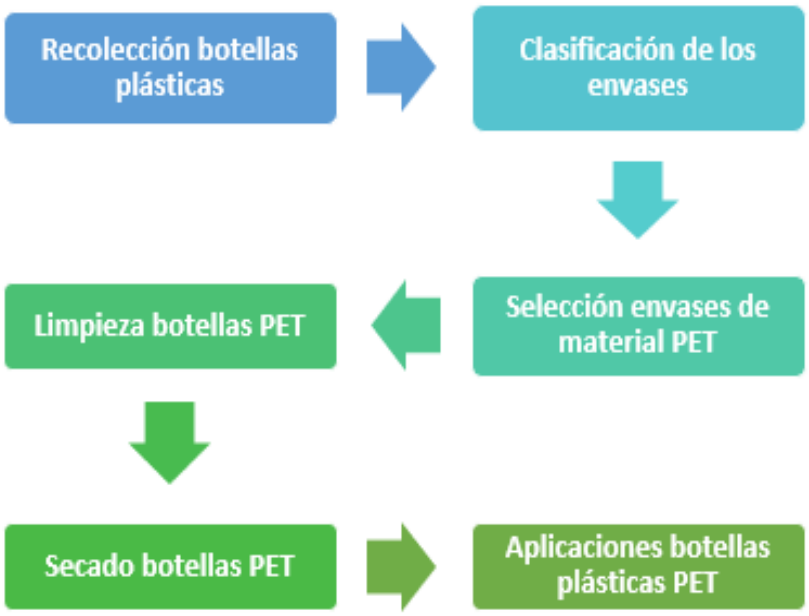



**Fig. 22**. Diagrama de flujo. Reciclaje botellas PET

- **Síntesis obtención material dieléctrico del polímero PET de las botellas plásticas.**

Como se ha mencionado anteriormente, la materia prima consta del material PET, obtenida de las botellas plásticas, procedentes del reciclaje, estos desechos plásticos no biodegradables que se encuentran en nuestro, está compuesto por un polímero termo plástico, siendo accesible, además de su disponibilidad, es un material idóneo para el diseño de un generador triboeléctrico

Para la extracción de láminas del material PET, a partir de las botellas plásticas recicladas, como material principal, se utilizó tijeras, cutter, marcador y regla métrica. Para la obtención del polímero sintético PET, se recorta de botellas residuales, compuestas por el material PET, que es un polímero termoplástico. Por lo tanto, este material se obtiene de las botellas plásticas, como se muestra la Fig. 23.

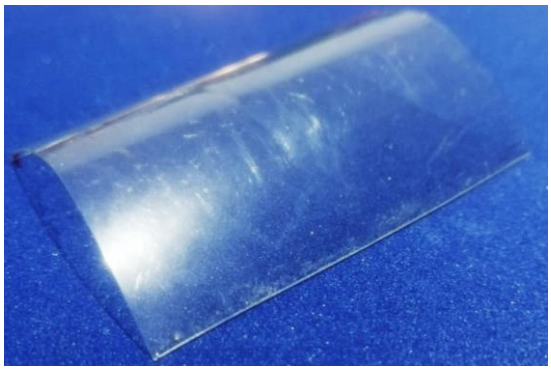


**Fig. 23.** Material triboeléctrico PET

- **Diagrama de Flujo – Obtención material dieléctrico PET.**

En la Fig.24, se ilustra el proceso para la obtención de las láminas PET, provenientes de los desechos plásticos, como las botellas plásticas recicladas.

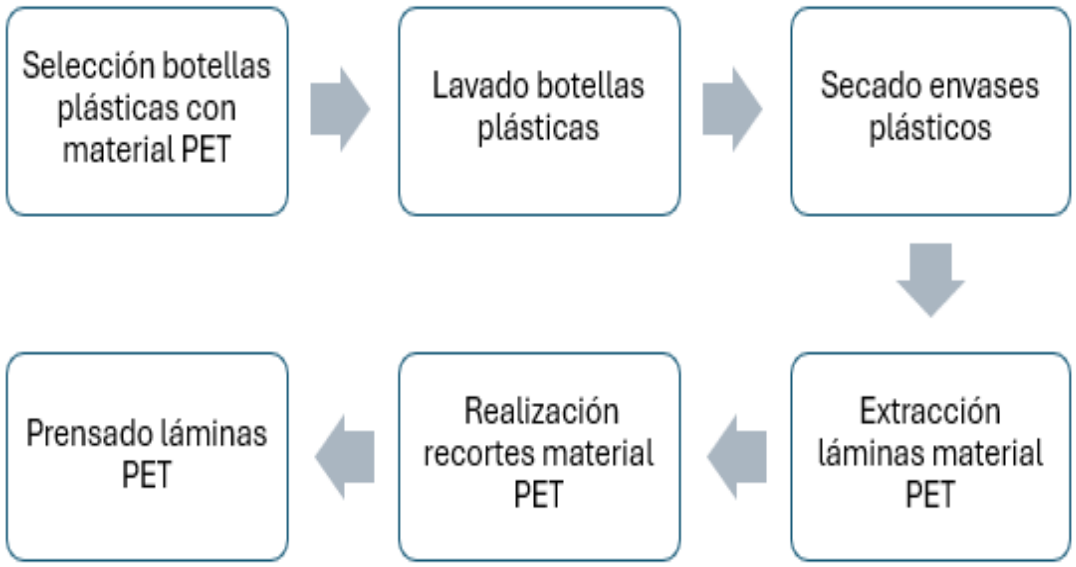



**Fig. 24**. Diagrama de flujo. Obtención láminas PET.

- **Elaboración lámina dieléctrica a partir de celulosa bagazo (caña azúcar) y polímero PET.**

Como primer paso, con ayuda de un mortero cerámico se trituro la celulosa de caña hasta la obtención de una fibra más delgada y fina, como se ilustra en la Fig.25 a),

posteriormente se procedió a recortar trozos más pequeños el polímero PET, este material se agregó dentro una olla antioxidante, luego con ayuda de una hornilla eléctrica se calienta hasta una alta temperatura, como se ilustra en la Fig. 25b). Seguidamente luego de 15 min el polímero PET, ha adquirido un tono color blanco, esto se debió al fuego expuesto, por la hornilla, a continuación, se procedió a revolver la combinación constantemente utilizando una varilla agitadora de vidrio, como se ilustra en la Fig. 25c).

Cuando el material polímero comenzó a derretirse, se agrega 1 ml de aceite de cocina, el aceite ayuda al proceso de dilución del material PET. Finalmente, una vez obtenida la dilución total del material del polímero PET, se agrega la celulosa. Seguidamente con ayuda de la varilla agitadora se revuelve la combinación constante por varios minutos, esta combinación adquiere una composición pastosa color marrón como se ilustra en la Fig. 25d).

**Fig. 25.** Procedimiento elaboración Lámina PET-celulosa caña. a) Trituración celulosa. b) Preparación hornilla. c) Calentamiento PET. d) Mezclado PET-celulosa caña de azúcar.

## 3.5 Diseño generador triboeléctrico

En la fabricación de un generador triboeléctrico de modo contacto vertical. Consistió en la utilización de materiales como se han mencionado anteriormente, se han utilizado láminas de Tereftalato de Polietileno (PET) combinada con el bagazo de caña de azúcar que cuenta con altos niveles de celulosa, y Policloruro de Vinilo (PVC), estos materiales tienen la función de actuar como capas dieléctricas. Por lo tanto, el contacto o rozamiento entre estos materiales consiste que exista un intercambio de carga eléctrica. Se utilizo como material conductor el metal aluminio, tiene la función de actuar como electrodos.

Los materiales seleccionados son fundamentales en el diseño del generador triboeléctrico, los materiales utilizados para su fabricación cumplen una función indispensable para el rendimiento de generar energía eléctrica. Además, se ha utilizado como soporte para el generador triboeléctrico el material PET, donde se cortó horizontalmente una porción de una botella plástica, para albergar a las capas dieléctricas, el uso de este material consiste en una mayor durabilidad mecánica al momento de presionar, gracias a su rigidez y además evita la fuga de carga eléctrica.

En el diseño del generador triboeléctrico, los materiales que conforman al generador se basan en los materiales PET/ celulosa de caña de azúcar como material triboeléctrico positivo y material triboeléctrico negativo el polímero PVC. Cuya geometría como el espesor y el área de contacto influye en la eficiencia del almacenamiento y separación de cargas eléctricas.

- **Diseño geometría generador triboeléctrico**

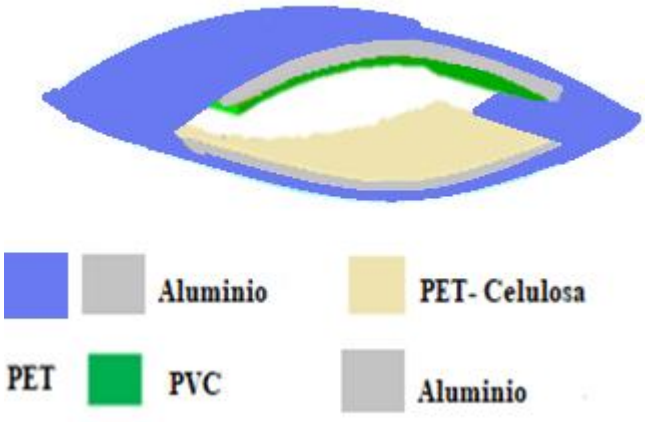



**Fig. 26.** Modelo TENG 3D, modo contacto.

El diseño del generador triboeléctrico, como se ilustra la Fig.26, como referencia se tomó una figura, de modelo 3D. Se crearon rectángulos para cada material en función de los componentes., en lo cual está conformado por los diferentes materiales triboeléctricos, donde se utilizó como electrodos el material conductor aluminio, estos electrodos son distribuidos tanto en la parte inferior y superior del generador triboeléctrico, de las láminas dieléctricas respectivamente.

Así mismo se utiliza, como lámina triboeléctrica negativa el material PVC, mientras que como lámina triboeléctrica positiva está conformada por una lámina dieléctrica PET/celulosa caña de azúcar. Como se ha mencionado anteriormente, hay diferentes parámetros de diseño de un generador triboeléctrico, en cuanto se refiere la generación de voltaje y corriente. Para el diseño del generador triboeléctrico, se utiliza los diferentes pares de materiales triboeléctricos, como nos muestra en la tabla 6. La celulosa de caña de azúcar (biopolímero) combinado con el polímero PET actúa como material dieléctrico tribopositivo, debido a su polaridad positiva (ceder electrones), la afinidad electrónica de los materiales se puede colaborar en la serie triboeléctrica.

El material PVC tiene una polaridad tribonegativa (ganancia de electrones), en comparación con la lámina dieléctrica de PET/celulosa. El material Aluminio (Al), es utilizado como electrodo, donde tiene una función muy indispensable en recoger la carga eléctrica que se genera en las láminas dieléctricas, cuando estas están en rozamiento o contacto.

**TABLA 6.** Configuración parámetros de diseño generador triboeléctrico

| **Configuración generador triboeléctrico** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Función** | **Material** | **Carga de superficie** | **Medida (m)** | **Espesor (m)** |
| **Electrodo 1** | Aluminio | Negativo | 0.04m x 0.02m | 12 $\mu m$ |
| **Electrodo 2** | Aluminio | Positivo | 0.04m x 0.02m | 12 $\mu m$ |
| **Lámina dieléctrica 1** | PET/celulosa bagazo caña azúcar | Positivo | 0.04m x 0.02m | 300 $\mu m$ |
| **Lámina dieléctrica 2** | PVC | Negativo | 0.04m x 0.02m | 300 $\mu m$ |

Las dimensiones de las capas dieléctricas y los electrodos se establecieron en 0.04m x 0.02 m, de esta manera se garantiza la uniformidad en las medidas geométricas de los componentes, como se ilustra en la tabla 6. Las láminas dieléctricas cuando se produce el contacto o fricción generan energía eléctrica, debido al efecto triboeléctrico y a su inducción electroestática, como se ha mencionado anteriormente.

- **Soporte para generador triboeléctrico**

En el diseño del generador triboeléctrico, el material PET, cumple con dos funciones indispensables, para el diseño. La primera función, combinada juntamente con la celulosa del bagazo caña de azúcar, actúa como material dieléctrico más positivo, debido a su afinidad electrónica en comparación con el material PVC.

La otra función de este tipo de material es producto de que actúa como soporte, para almacenar las láminas dieléctricas positivas y negativas del generador triboeléctrico, esto es a causa de su rigidez y no deformación cuando se aplica una fuerza mecánica externa sobre el generador, como se ilustra en la Fig.27.

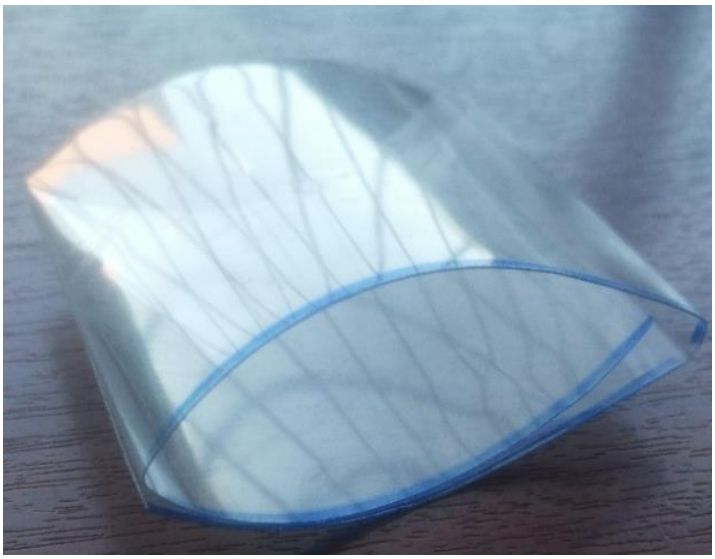


**Fig. 27.** Soporte generador triboeléctrico.

Las medidas del soporte del generador triboeléctrico construido a partir de las botellas plásticas PET, en lo cual el soporte está conformado por un área de $0.0025\ m^2$,

tiene como función en establecer como soporte para el generador triboeléctrico, en el cual se da lugar a los electrodos y las láminas dieléctricas, como se muestra en la Fig. 28a). La distancia entre las superficies inferior y superior del soporte, donde se han almacenado las capas dieléctricas, como se muestra en la Fig.28b).

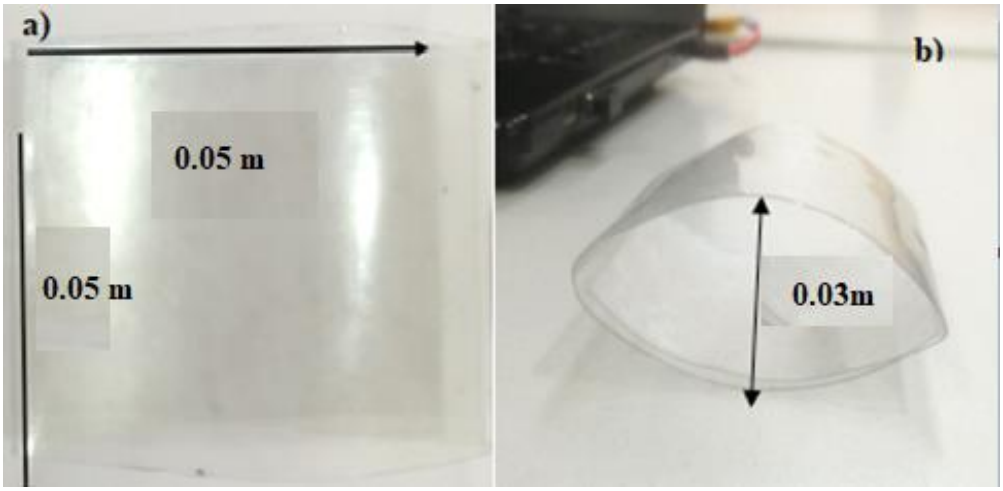



**Fig. 28**. Medidas soporte material PET.

- **Electrodo (Cinta de aluminio)**

Como se muestra en la Fig. 29, el tipo de electrodo que se utiliza es el conductor compuesto por el material aluminio, este material proporciona una gran conductividad eléctrica en el generador triboeléctrico, por lo tanto, este material es indispensable en el diseño propuesto. El electrodo tiene como función en captar o recoger la carga eléctrica de la capa o lámina dieléctrica. Por lo tanto, se encarga en administrar dicha carga del material dieléctrico.

**Fig. 29.** Cinta de aluminio

- **Lámina dieléctrica PET/ celulosa de caña de azúcar**

La combinación del material biodegradable de la celulosa con el polímero PET, se vertió sobre una capa de fibra de vidrio, esto es debido a que soporta una alta temperatura. Posteriormente con ayuda de una espátula inoxidable, se expandió esta combinación hasta obtener una lámina delgada. El proceso de la fabricación de la lámina dieléctrica PET/celulosa de caña azúcar, finaliza cuando se deja secar a temperatura ambiente por 24 horas, como se muestra en la Fig.30.

**Fig. 30.** Lámina dieléctrica PET-celulosa caña de azúcar.

- **Polímero sintético - PVC**

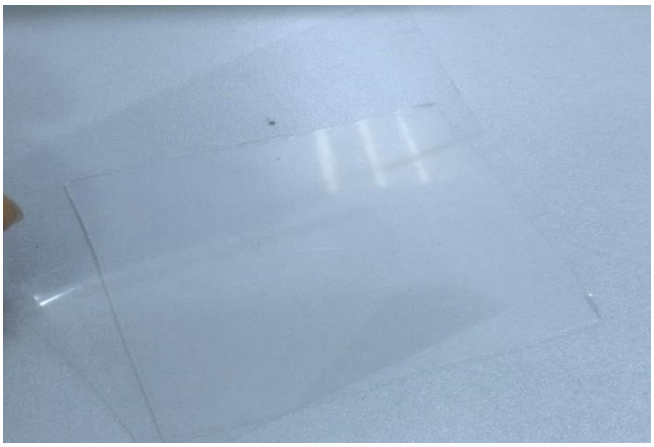


**Fig. 31.** Lámina PVC

El polímero sintético de PVC, que se ilustra en la Fig. 31, actúa como material triboeléctrico de carga negativa debido a su alta capacidad para captar electrones durante, debido a su afinidad electrónica Este comportamiento se debe a la estructura química del PVC, que contiene átomos de cloro altamente electronegativos. Estos átomos tienden a atraer electrones de otros materiales con los que entran en contacto, generando así una carga negativa en la superficie del PVC.

- **Montaje generador triboeléctrico**

  - **Montaje generador triboeléctrico lámina dieléctrica PET- celulosa y PVC.**

Para el montaje del generador triboeléctrico, se han utilizado los diferentes materiales, la lámina dieléctrica PET/ celulosa de caña de azúcar y una lámina dieléctrica del material PVC, se sigue el procedimiento de la sección 3.5, donde se utiliza materiales necesarios como lo son: electrodos, soporte, cables de conexión y láminas dieléctricas. La configuración de diseño del generador triboeléctrico corresponde, a la lámina dieléctrica tribopositivo PET- celulosa de caña de azúcar, mientras como material tribonegativa al material PVC.

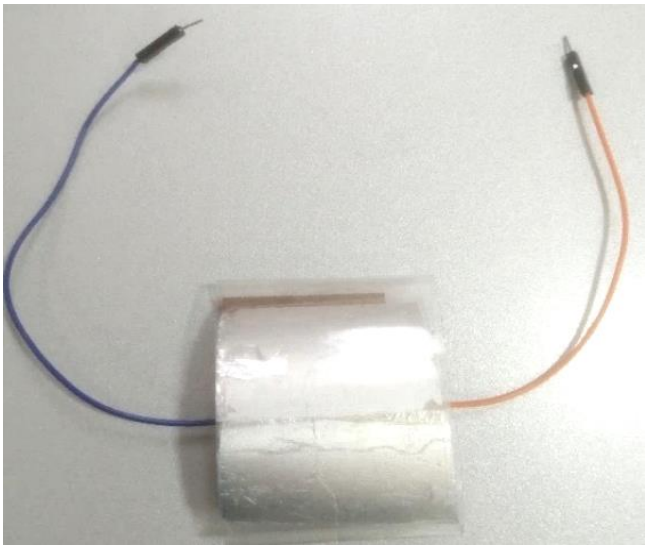


**Fig. 32.** Montaje TENG

Para el desarrollo del montaje del generador triboeléctrico, como punto inicial consiste en la preparación del soporte del dispositivo, donde se depositan los electrodos

conformados por el material de aluminio y las láminas dieléctricas, donde previamente se ha recortado de una botella plástica, las medidas para la fabricación del soporte corresponden a 0.05 m de ancho por 0.2 m de largo. Seguidamente se han diseñado las láminas dieléctricas con una medida de 0.02 m de ancho por 0.04 m de largo.

A continuación, se ubicaron los electrodos de aluminio, con las siguientes dimensiones 0.02 m de ancho y 0.04 m de largo, sobre la parte inferior de la lámina dieléctrica de PET/celulosa de caña, que funge como material triboeléctrico positivo, mientras que el otro electrodo se ubicó sobre la parte superior de la lámina dieléctrica de PVC, los electrodos se fijan en su lugar, asegurándose de que haya un buen contacto entre lámina dieléctrica y el electrodo.

Una vez realizado el montaje del generador triboeléctrico, donde los materiales están en su respectivo lugar, como se ilustra en la Fig. 33 a) se observa el generador triboeléctrico de vista superior, en cada uno de los dos electrodos del generador que son ubicados en la parte superior e inferior, se insertaron los cables conductores respectivamente. En la Fig. 33 b) se muestra el generador triboeléctrico de vista frontal, donde se observa que existe una distancia entre las capas dieléctricas.

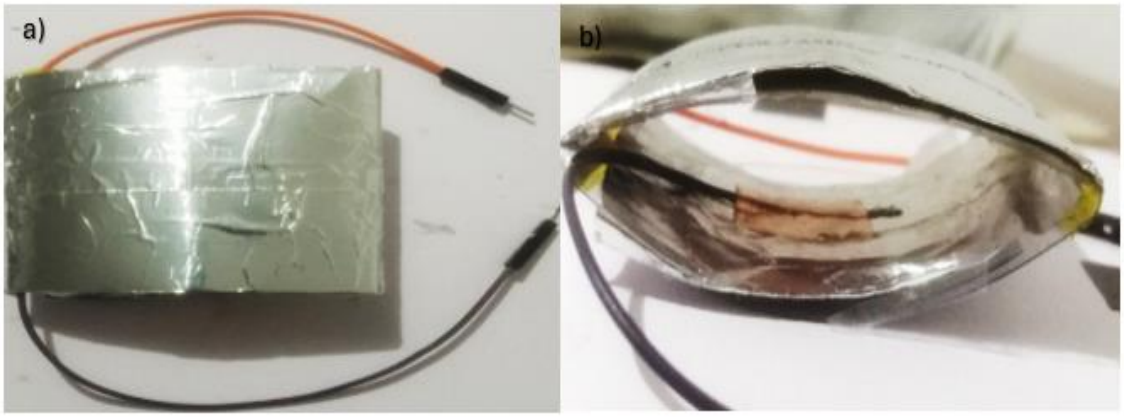



**Fig. 33.** Generador triboeléctrico. (a) Vista superior TENG. (b) Vista frontal TENG.

El montaje de todos los materiales que conforman el generador triboeléctrico es necesario en seguir un proceso de montaje riguroso, para asegurar un ajuste preciso de todas las piezas. De esta manera se asegura de que no exista una posible fuga de corriente cuando, al momento de aplicar una fuerza externa sobre el generador triboeléctrico.

## 3.6 Ecuaciones matemáticas en la caracterización generador triboeléctrico

A continuación, se detallan las ecuaciones matemáticas utilizadas para el cálculo de voltaje, corriente, densidad carga superficial, de un generador triboeléctrico. El contacto entre materiales diferentes generalmente resulta en la transferencia de carga de un material a otro en una dirección predecible, el orden de los materiales en la dirección de la carga transferida se llama secuencia triboeléctrica. [21] Debido al efecto triboeléctrico, se transfieren cargas superficiales. a través del área de contacto.

La principal ecuación para abordar la generación de electricidad de un generador triboeléctrico es una conexión entre 3 límites: el voltaje que existe entre los correspondientes electrodos, cuánta carga se mueve en el medio y en el distanciamiento de división entre las dos capas cargadas triboeléctricas, que puede significarse como (V-Q-x) [41], donde se refiere al voltaje del circuito abierto, carga eléctrica transferida, distancia entre capas dieléctricas, respectivamente [41]. El circuito equivalente del TENG es similar al modelo de Ebers-Moll de transistores bipolares.

- **Ecuación matemática circuito equivalente generador triboeléctrico**

El modelo del circuito equivalente del generador triboeléctrico también puede derivarse de relación entre el voltaje, distancia y carga, dando origen a la ecuación 1 [62], como se muestra a continuación.

$$V = -\frac{1}{C_{TENG}} Q + V_{OC} \qquad (1)$$

**Donde:**

$\boldsymbol{C_{TENG}}$ = capacitancia entre electrodos

$\boldsymbol{V_{OC}}$ = voltaje circuito abierto

$\boldsymbol{Q}$ = carga transferida entre electrodo.

A partir de la ecuación 1, hay dos términos en el lado derecho, que pueden representarse mediante dos elementos del circuito en el modelo de circuito equivalente.

El primero es un término de capacitancia, que se origina a partir de la capacitancia entre los dos electrodos y puede representarse mediante un condensador ($C_{TENG}$) [62].

El otro es un término de voltaje de circuito abierto, que se origina a partir de la separación de las tribocargas polarizadas y puede representarse mediante un voltaje ideal ($V_{OC}$). [62] En combinación de estos dos, todo el modelo de circuito equivalente puede ser representado por una conexión en serie de una fuente de tensión ideal y un capacitor, como se muestra en la Fig. 34.

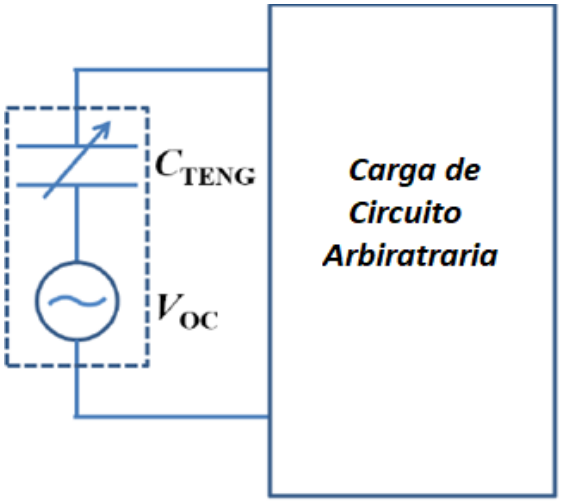



**Fig. 34.** Cirquito equivalente TENG. [62]

El modelo de circuito equivalente es muy útil para comprender la física central de TENG. Por ejemplo, la resistencia óptima y el comportamiento de tres regiones de trabajo pueden ser fácilmente comprensible a partir de este modelo de circuito equivalente, que se debe inherentemente a la coincidencia de impedancia entre $C_{TENG}$ y la resistencia de salida [62].

La capacitancia inherente de TENG mostrará la impedancia a la señal de CA desde $V_{OC}$. Cualquier parámetro estructural que aumentará esta capacitancia inherente disminuirá esta impedancia y por lo tanto disminuirá la resistencia igualada [62].

Aumentar la velocidad del movimiento es equivalente a aumentar la frecuencia de la señal CA de $V_{OC}$ por lo que la resistencia combinada también se reducirá. Desde la impedancia de $C_{TENG}$ es independiente de la densidad de tribocargas, la carga adaptada de la resistencia tampoco se ve afectada por la densidad de las cargas triboeléctricas[63].

- **Ecuaciones matemáticas de un TENG modo contacto dieléctrico-dieléctrico**

Como ya se mencionó en el capítulo anterior sobre la clasificación del generador TENG, por modo contacto se dividen en dos circunstancias, el primer punto hace referencia a un generador triboeléctrico modo contacto dieléctrico-dieléctrico, el segundo punto consiste en el modo contacto conductor-dieléctrico [41].

El desarrollo del diseño del generador triboeléctrico nos basamos en el modelo de un TENG, modo de contacto dieléctrico-dieléctrico. Como nos muestra la Fig.12a), en lo cual consiste en la demostración de los parámetros que intervienen como lo son sus d1, d2 (espesores dieléctricos), x(t) la distancia entre las capas dieléctricas [41].

Además, que para este tipo de generador TENG cuenta con dos metales (electrodos) en sus extremos, en los cuales existe Q (cargas transferidas entre los electrodos), así mismo en la $\sigma$ (densidad de carga superficial). Por lo tanto, este modelo de TENG se puede deducir que existe una capa superior e inferior, cuando existe el contacto entre estos se produce una diferencia de potencial [64] . De esta forma, según el teorema de Gauss, la intensidad del campo eléctrico en cada zona de la región se representa en la ecuación 2, ecuación 3, ecuación 4 [41].

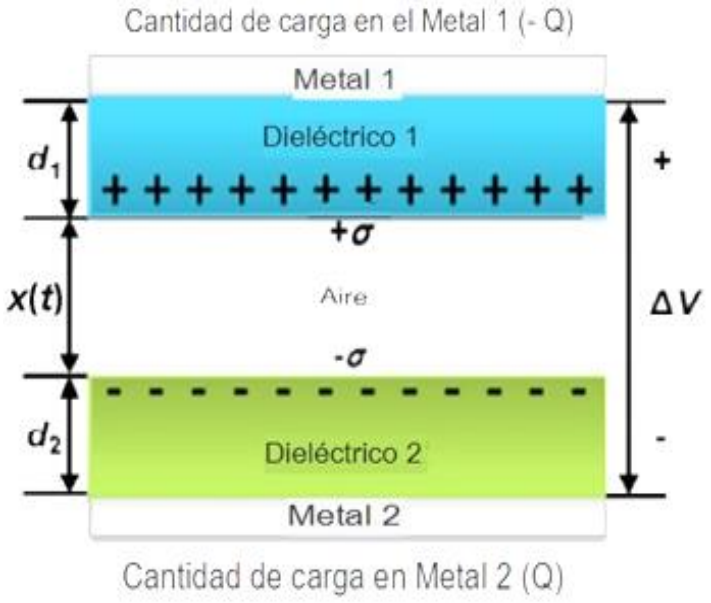



**Fig. 35.** TENG modo contacto dieléctrico-dieléctrico. [41]

- **Dentro Dieléctrico 1:**

$$E_1 = -\frac{Q}{S\varepsilon_0\varepsilon_1} \quad (2)$$

- **Dentro Dieléctrico 2:**

$$E_2 = -\frac{Q}{S\varepsilon_0\varepsilon_2} \quad (3)$$

- **Dentro entrehierro:**

$$E_{air} = -\frac{\frac{Q}{S} + \sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

**Donde**

S = superficie contacto triboeléctrico

Q = carga inducida a los electrodos, ejercidas por un circuito externo

$\sigma(t)$ = densidad de carga superficial interfaz triboeléctrica

Q/S = densidad de carga inducida electrodos

$\varepsilon_0$= constante permitividad aire ($8.854x10^{-12}\ C^2/Nm^2$)

### 3.6.1 Voltaje circuito abierto

Para calcular el voltaje de circuito abierto de un generador eléctrico, modo contacto vertical, donde hace referencia al voltaje de circuito abierto representado por ($V_{OC}$) [41], como se ilustra en la ecuación 5.

$$V_{OC} = \frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

**Donde**

$V_{OC}$ = voltaje circuito abierto

$\sigma$ = densidad carga triboeléctrica

$x(t)$ = distancia entre capas dieléctricas

$\varepsilon_0$ = constante permitividad vacío $\left(8.854x10^{-12}\frac{C^2}{Nm^2}\right)$

### 3.6.2 Corriente corto circuito generador triboeléctrico modo contacto

Para calcular la corriente de corto circuito de un generador triboeléctrico en el modo de operación de contacto de forma vertical [41] , a continuación, se presenta en la siguiente ecuación 6.

$$I_{SC} = \frac{S\sigma d_0 v(t)}{(d_0 + x(t))^2} \quad (6)$$

**Donde**

$I_{SC}$ = corriente corto circuito

$\sigma$ = densidad de carga triboeléctrica

$S$ = superficie del electrodo

$v(t)$ = velocidad movimiento mecánico

$x(t)$ = distancia entre capas dieléctricas

$d_0 =$ constante espesor efectivo

Mientras que las características de salida de carga cortocircuito $(Q_{SC})$ y capacitancia $(C)$ del modo contacto, se puede derivar basándose en la electrodinámica [41], se ilustra en la ecuación 7.

$$Q_{SC} = \frac{S\sigma x(t)}{d_0 + x(t)} \quad (7)$$

**Donde**

$Q_{SC}$ = Carga cortocircuito

$S$ = área capa dieléctrica

$x(t)$ = distancia entre capas dieléctricas

$d_0$ = constante espesor efectivo

Para calcular la capacitancia del generador triboeléctrico [64],[41], se puede obtener aplicando la ecuación 8.

.

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0 + x(t)} \qquad (8)$$

**Donde**

$\varepsilon_0$ = constante permitividad

$S$ = área capas dieléctricas

$d_0$ = constante espesor efectivo

$x(t)$ = distancia entre capas dieléctricas

### 3.6.3 Densidad carga triboeléctrica

Los pares de superficies con cargas opuestas son cruciales para la generación de energía triboeléctrica [65]. El mecanismo de generación de energía de un generador triboeléctrico implica un movimiento mecánico periódico que separa las cargas superficiales establecidas por la electrificación triboeléctrica, provocando cambios en el potencial eléctrico entre los electrodos.

En los modelos TENG de contacto, hay muchos parámetros que se pueden controlar experimentalmente, incluida la distancia máxima de separación, la frecuencia mecánica, el área de superficie dieléctrica, la resistencia de carga y la capacitancia.

Estos parámetros forman un gran espacio de fase que depende unos de otros, se puede combinar una gran cantidad de parámetros del dispositivo en varias cantidades adimensionales que guían la efectividad de la generación de energía. Estos parámetros son la resistencia y la capacitancia [65].

El nanogenerador triboeléctrico (TENG) puede recoger eficazmente vibraciones mecánicas ambientales de baja frecuencia, el rendimiento de salida de TENG depende en gran medida de la carga generada por el efecto triboeléctrico [65].

La carga superficial máxima de la densidad depende de la diferencia de potencial superficial entre materiales convencionales. Por lo tanto, el mecanismo de densidades de carga superficial ultra altas depende del proceso dinámico de carga en los materiales de los TENG [66].

Para determinar la densidad de carga superficial de un TENG modo contacto [66], nos basamos de la ecuación 5, por consiguiente, haciendo el despeje de $\sigma$ (densidad carga triboeléctrica), se obtiene ecuación 9, como se muestra a continuación.

$$\sigma = \frac{V_{OC}\varepsilon_0}{x(t)} \qquad (9)$$

**Donde**

$\sigma$ = densidad de carga superficial

$V_{OC}$= voltaje circuito abierto

$x(t)$ = distancia entre las capas dieléctricas

$\varepsilon_0$ = constante permitividad vacío

Para el cálculo del generador en corto circuito, la densidad de carga transferida [66], se puede describir mediante la siguiente ecuación 10.

$$\sigma_{SC} = \frac{\sigma_t}{x(t) + d_0} x(t) \qquad (10)$$

**Donde**

$\sigma_{SC}$ = densidad carga transferida en cortocircuito

$\sigma_t$ = carga densidad triboeléctrica

$x(t)$ = distancia entre capas dieléctricas

$d_0$ = constante espesor efectivo

Las cargas transferidas entre los electrodos de un generador triboeléctrico [67], cuando dos superficies cargadas triboeléctrica mente son completamente liberadas. Se puede obtener mediante la siguiente ecuación 11,

$$Q = \frac{\sigma x(t)\varepsilon_{r1}\varepsilon_{r2}}{d_1\varepsilon_{r2} + d_2\varepsilon_{r1} + x(t)\varepsilon_{r1}\varepsilon_{r2}} \qquad (11)$$

**Donde**

$Q$ = cargas trasferidas entre electrodos

$\sigma$ = densidad carga superficial

$x(t)$ = distancia entre capas dieléctricas

$\varepsilon_{rn}$ = constantes dieléctricas relativas

$d_n$ = espesor capas dieléctricas

# CAPITULO IV

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se enfoca en el análisis y los resultados obtenidos de un generador triboeléctrico, donde se hizo uso de materiales de residuos locales, como el residuo natural agrícola del bagazo de caña de azúcar y en la utilización de botellas plásticas. Mediante un procedimiento se obtuvo la celulosa del residuo, donde además también se hizo uso de botellas plásticas compuestas por el polímero Polietileno Tereftalato (PET) y el uso del polímero de PVC. Además, para este generador triboeléctrico, se hace uso del material conductor eléctrico de aluminio, que actúa como electrodo.

## 4.1 Nanoestructura celulosa bagazo caña de azúcar

La celulosa natural tiene una serie de ventajas destacadas como su abundancia, bajo precio, renovabilidad, biodegradabilidad, respeto al medio ambiente. Este material se encuentra en grandes cantidades en el medio ambiente, debido a la producción de sus plantaciones, lo cual consiste en materia orgánica natural, especialmente provenientes de la madera y demás materiales orgánicos. En la Fig. 36, se ilustra una imagen TEM (microscopio electrónico de transmisión) de la estructura de la nanocelulosa del bagazo de caña de azúcar [48].

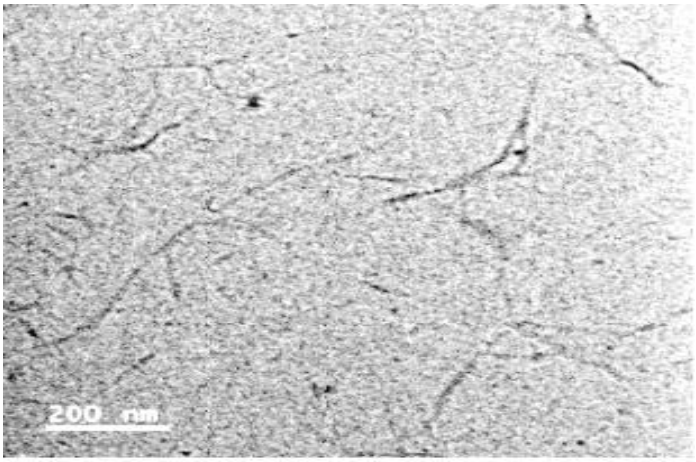



**Fig. 36**. Ilustración TEM, nanocelulosa. [48]

- **Análisis microscópico superficie material láminas dieléctricas.**

Mediante un análisis SEM (microscopio electrónico de barrido), realizado en un laboratorio, se utilizó una técnica, mediante un haz de electrones, se obtuvo una imagen microscópica de las superficies de las muestras de las láminas dieléctricas. Donde además se obtuvo el resultado de la densidad de carga superficial, para lo cual se utilizó las láminas dieléctricas, mencionadas en el capítulo anterior, el resultado obtenido de las láminas dieléctricas se ilustra en la tabla 7.

**TABLA 7.** Análisis SEM - láminas dieléctricas

| **Lámina dieléctrica** | **Densidad carga superficial** $(\sigma)$ $C/m^2$ |
|---|---|
| **PET/celulosa caña de azúcar** | $6.64x10^{-8}\ C/m^2$ |
| **PVC** | $2.26\ x10^{-7}\ C/m^2$ |

Como se puede apreciar los resultados obtenidos del análisis SEM, en la tabla 7 de las láminas dieléctricas de PET/celulosa de caña de azúcar y PVC. La combinación entre el polímero PET y la celulosa, se determinó la densidad de carga superficial de $6.64x10^{-8}\ C/m^2$. Mientras que el polímero PVC presentó una densidad de carga superficial significativamente mayor de $2.26\ x10^{-7}\ C/m^2$.

## 4.2 Mecanismo funcionamiento generador triboeléctrico

El mecanismo de trabajo detallado del generador triboeléctrico proporciona información sobre la inducción electrostática. En la Fig. 37, los pares triboeléctricos (PET/celulosa y PVC), la lámina dieléctrica de bagazo de caña azúcar - PET están unidas a la capa dieléctrica inferior, mientras que el material de PVC sirve como capa dieléctrica superior.

Como electrodo conductor se utiliza material Aluminio. En el paso inicial (Presionado), cuando se aplica una fuerza externa al dispositivo, las capas dieléctricas superior e inferior entran en contacto entre sí, creando una carga negativa en la superficie de la película de PVC y una carga positiva en la celulosa de bagazo / PET. Cuando la capa dieléctrica inferior y la capa dieléctrica superior se separan entre sí, los dos electrodos conductores adquieren cargas inducidas opuestas a la capa triboeléctrica debido a la fuerza ejercida sobre el dispositivo, y se produce un diferencial de potencial electrostático entre los dos electrodos.

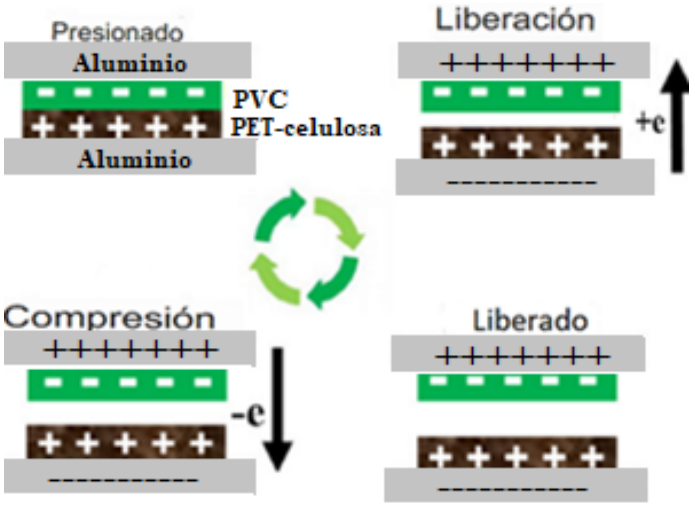



**Fig. 37.** Mecanismo funcionamiento generador triboeléctrico.

En el paso (Liberación), debido a la ocurrencia de este fenómeno, los electrones pueden fluir entre los electrodos inferior y superior mediante un circuito externo. Este fenómeno es responsable del semiciclo positivo de la señal de salida. En el paso (Liberado) de la Fig. 37, cuando la carga inducida alcanza un estado de equilibrio, no fluye corriente entre los electrodos.

En el paso (Comprensión), cuando se restablece el contacto entre las dos capas triboeléctricas aplicando fuerza externa nuevamente, se detecta una corriente inversa entre los dos electrodos. Esto da como resultado un semiciclo negativo de la corriente. Por tanto, cuando este fenómeno se produce periódicamente, se produce una señal eléctrica continua de salida de CA.

- **Aplicación energía mecánica**

**Fig. 38.** Motor eléctrico lineal.

En el laboratorio de la carrera de Electricidad, de la Universidad "Técnica del Norte", ubicado en el campus del Olivo, de la ciudad de Ibarra, Imbabura. Se utilizó un motor eléctrico lineal, como se ilustra en la Fig. 38 este motor, nos permitió controlar la frecuencia de vibración de contacto entre los materiales, a una determina distancia. En lo cual el motor eléctrico lineal, tiene una frecuencia de salida conformado por rango de 1 Hz hasta los 5 Hz, con una fuerza aplicada de 1N.

## 4.3 Medición voltaje circuito abierto generador triboeléctrico

- **Medición voltaje generador triboeléctrico PET/celulosa de caña de azúcar-PVC**

Para medir el voltaje de circuito abierto se utilizó un multímetro digital, además que el contacto o rozamiento entre las láminas dieléctricas para generar energía eléctrica se

determinó en un tiempo estimado de 30s. Se estableció una distancia entre las láminas dieléctricas del generador triboeléctrico, a una distancia de separación de 0.015m. Como se muestra en la tabla 8, en lo cual se observan los resultados obtenidos del voltaje de circuito abierto a una determinan distancia del generador triboeléctrico.

- **Medición voltaje circuito abierto, distancia entre capas dieléctricas de 0.015 m**

**TABLA 8.** Medición voltaje, distancia entre capa dieléctrica 0.015 m

| Frecuencia (Hz) | $V_{OC}$ $(V)$ | Tiempo (s) | Distancia (m) |
|---|---|---|---|
| **1** | 9.3 | 30 | 0.015 |
| **2** | 16.8 | 30 | 0.015 |
| **3** | 28.7 | 30 | 0.015 |
| **4** | 33.2 | 30 | 0.015 |
| **5** | 41.7 | 30 | 0.015 |

El valor de voltaje de circuito abierto generado por el material triboeléctrico PET/celulosa de caña y PVC, con los parámetros de configuración de diseño, donde se utiliza como electrodo el material de aluminio, se obtuvo la medición del voltaje del circuito abierto del generador, donde el valor del voltaje máximo de circuito abierto de 41.7 V, cuando se aplicó una frecuencia de vibración de 5 Hz.

- **Medición voltaje circuito abierto, distancia entre capas dieléctricas de 0.03 m**

**TABLA 9.** Medición voltaje circuito abierto, distancia entre capas dieléctricas de 0.03 m

| Frecuencia (Hz) | $V_{OC}$ $(V)$ | Tiempo (s) | Distancia (m) |
|---|---|---|---|
| **1** | 12.3 V | 30 | 0.03 |
| **2** | 22.8 V | 30 | 0.03 |
| **3** | 30.7 V | 30 | 0.03 |
| **4** | 44.2 V | 30 | 0.03 |
| **5** | 54.1 V | 30 | 0.03 |

Se estableció una distancia de separación entre las láminas dieléctricas del generador triboeléctrico, en un rango de separación de 0.03m, el rango de medición del voltaje de circuito abierto se estableció un tiempo de 30s. Como se muestra en la tabla 9, dando como resultado un voltaje máximo de circuito abierto de 54.1V, al aplicar una frecuencia de 5Hz a una distancia de separación de 0,03m entre láminas dieléctricas del generador triboeléctrico.

- **Resultados medición voltaje de circuito abierto a distintas distancias entre láminas dieléctricas**

**TABLA 10.** Resultado mediciones voltaje circuito abierto

| **Valores obtenidos** | | |
|---|---|---|
| **Especificación** | **Distancia (m)** | $\boldsymbol{V_{OC}}$ $\boldsymbol{(V)}$ |
| **PVC- PET/celulosa caña** | 0.015 m | 41, 7 V |
| | 0.03 m | 54.1 V |

Como se muestra en la tabla 10, se presentan el resultado de los voltajes del circuito abierto del generador del triboeléctrico, a su respectiva configuración. El voltaje máximo de circuito abierto registrado fue de 54.1 V, a una distancia de 0.03 m. Por otro lado, se obtiene un valor significativamente más bajo de 41.7 V, en la distancia establecida de 0.015 m.

De esta manera se determina que el rendimiento de salida de voltaje de circuito abierto depende de la distancia entre las láminas dieléctricas establecidas en el generador triboeléctrico, es decir a una mayor distancia entre capas dieléctricas, mayor será su salida de voltaje, esto es debido a que el voltaje de salida es proporcional a la distancia, donde al aumentar la distancia entre las láminas dieléctricas, se acumula mayor carga eléctrica.

## 4.4 Cálculo densidad carga triboeléctrica generador

- **Calculo densidad carga triboeléctrica distancia de 0.015 m**

Con los datos mostrados en la tabla 10, se procede a obtener la densidad superficial del generador triboeléctrico, donde se selecciona el voltaje máximo de circuito abierto, con el fin de demostrar la capacidad máxima de la densidad de carga triboeléctrica, a una distancia entre capas dieléctricas de 0.015 m.

**TABLA 11.** Densidad carga triboeléctrica, distancia de 0.015 m.

| Especificación | $V_{OC}$ $(V)$ | Distancia entre capas dieléctricas (m) | Densidad carga superficial ($\sigma$) |
|---|---|---|---|
| **PET/celulosa de caña - PVC** | 41.7 V | 0.015 m | $2.46x10^{-8}\ C/m^2$ |

Se toma el voltaje de circuito abierto de 41.7 V, de esta manera se obtiene la densidad de carga de la superficie del área de contacto del generador triboeléctrico, para calcular la densidad superficial, se aplica la ecuación 9. El voltaje de circuito abierto del generador es proporcional a la densidad de carga superficial del generador triboeléctrico, el resultado obtenido se ilustra en la tabla 11.

- **Calculo densidad carga superficial dieléctrica distancia de 0.03 m.**

Para determinar la densidad superficial del generador triboeléctrico, se toma el valor del voltaje máximo de circuito abierto de la distancia entre capas dieléctricas de 0.03 m, que se muestra de la tabla 9. La distancia entre las capas dieléctricas influye en la salida de voltaje del circuito abierto de dicho generador, es decir a una mayor distancia entre estas (láminas dieléctricas), la diferencia de potencial es mucho mayor conforme aumenta la distancia de dichas láminas. El resultado obtenido se muestra en la tabla 12.

**TABLA 12.** Densidad carga triboeléctrica, distancia de 0.03 m.

| Especificación | $V_{OC}$ $(V)$ | Distancia entre capas dieléctricas (m) | Densidad carga superficial ($\sigma$) |
|---|---|---|---|
| **PET/Bagazo de caña – PVC** | 54.1 V | 0.03 m | $9.58x10^{-9}\ C/m^2$ |

## 4.5 Diseño sistema almacenamiento energía

El objetivo del diseño del sistema de almacenamiento de energía para el generador triboeléctrico es en maximizar la transferencia y utilización de la energía generada, de esta manera se aprovecha la energía, producida por el generador triboeléctrico. Para el diseño de un sistema de almacenamiento de carga se optó por un sistema común, donde está conformado por elementos como los diodos rectificados, capacitor.

Para transformar la corriente AC en corriente DC, producida por el generador triboeléctrico se utiliza un puente de diodos que actúa como rectificador, donde transforma los valores negativos en positivos.

Para almacenar la carga, producida por el generador triboeléctrico, se procede a utilizar un circuito externo para almacenar esta energía. La energía producida del generador triboeléctrico se puede capturar o almacenar, esta energía capturada se almacena o se utiliza directamente, dependiendo de la aplicación especificada. La señal de corriente alterna (CA) no es adecuada para operar los dispositivos electrónicos de baja potencia, por lo que la señal de CA se rectifica mediante un puente de diodos rectificadores de onda completa.

- **Diagrama esquemático circuito eléctrico generador triboeléctrico**

El circuito eléctrico del generador triboeléctrico incorpora un puente de diodos de onda completa, cuya función principal es rectificar el voltaje de salida, transformando la corriente alterna en corriente continua. Este proceso es fundamental para garantizar una salida más estable y utilizable en diversas aplicaciones.

Además, el circuito incluye un capacitor, un componente clave en la etapa de filtrado, ya que reduce las fluctuaciones y el rizado presentes en la señal rectificada, mejorando así la estabilidad del voltaje de salida. La combinación del puente rectificador y el capacitor permite obtener una corriente más uniforme, lo que optimiza el rendimiento del generador.

El diseño del circuito está representado en el diagrama esquemático de la Fig. 39, donde se ilustran la disposición de los componentes y su interconexión, asegurando un flujo eficiente de energía dentro del sistema.

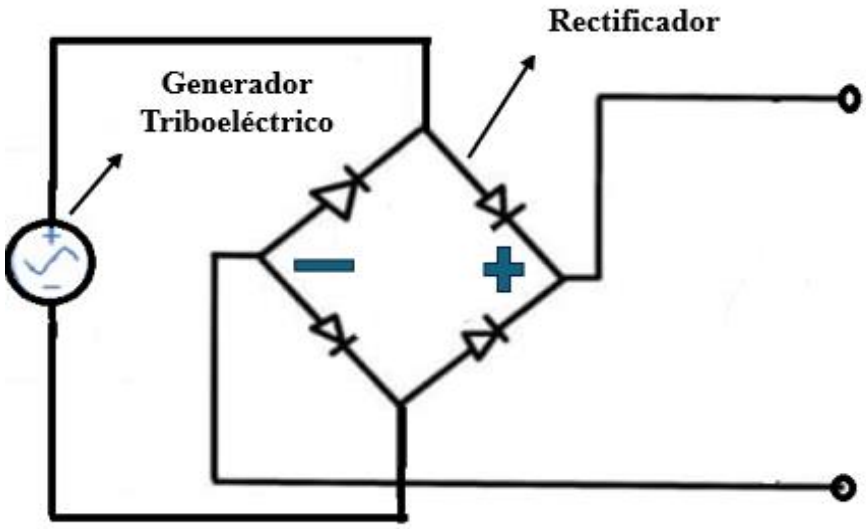



**Fig. 39.** Diagrama circuito esquemático generador triboeléctrico

- **Conversión AC-DC**

- **Rectificador**

Para maximizar el almacenamiento de energía, es esencial evaluar el efecto de rectificación sobre la onda producida por un nanogenerador triboeléctrico. La corriente alterna pulsante de estos dispositivos se transforma en corriente continúa sometiéndola a un proceso de rectificación. Dado que la mayoría de las baterías y equipos eléctricos funcionan con corriente continua, esta conversión es esencial.

Se utiliza diodos Schottky 1N5819, se escogió estos diodos, en cuestión a su nivel de caída de voltaje de 0,3 V y además en nivel bajo de activación de 0.6 V, de esta manera favorece a la conversión de corriente, del generador triboeléctrico. El diagrama del circuito de rectificación del generador triboeléctrico se ilustra en la Fig. 40.

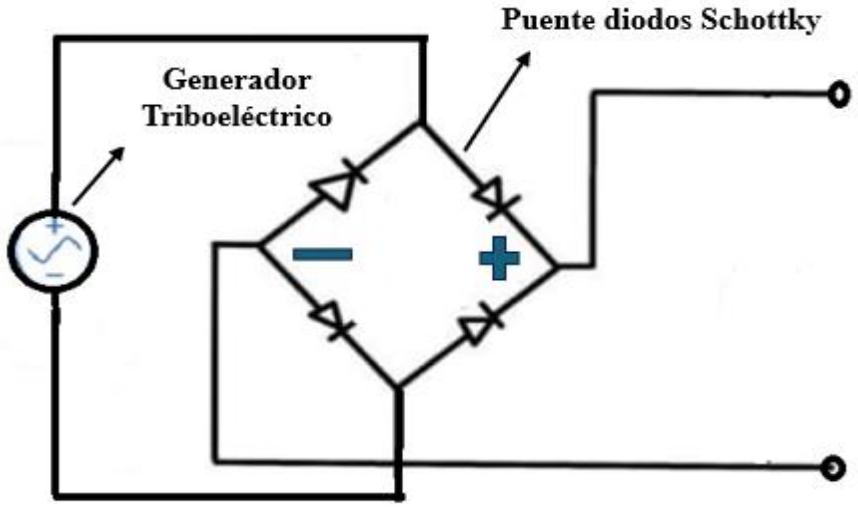



**Fig. 40.**Diagrama TENG - Puente diodos

- **Capacitor**

Los condensadores son componentes fundamentales, cumplen la función de almacenar la carga eléctrica acumulada y permitir una descarga regulada y eficaz. Se utilizo un capacitor que está conectado en la salida del puente de diodos rectificador Schotty, este elemento electrónico tiene la funcionalidad de la realizar la etapa de filtrado, una vez que se realizado la conversión de la corriente de AC a DC en el puente de diodos. Además, que almacena la energía eléctrica generada, su uso es indispensable en la conversión de la corriente alterna en corriente directa. En este tipo de circuitos se puede visualizar de tal manera, que establezcan las diferentes actividades, como se muestra en la Fig.41.

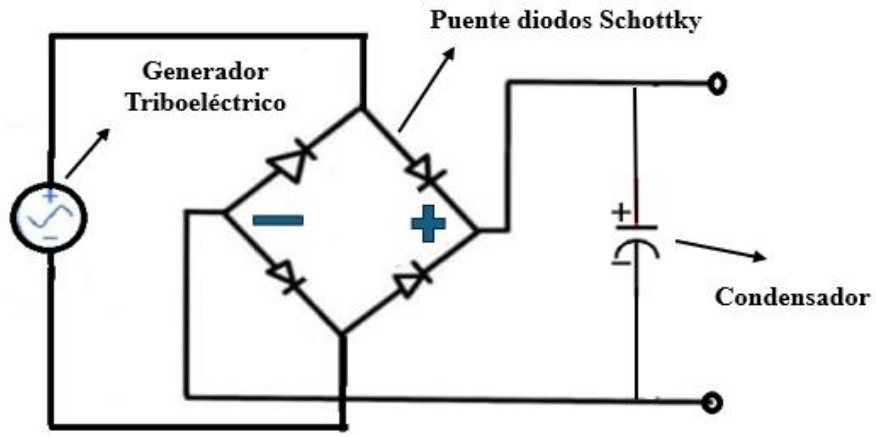



**Fig. 41.** Diagrama TENG-Capacitor.

La elección de los componentes electrónicos para el almacenamiento y garantizar una eficiencia óptima de la conversión de energía conociendo cómo se comporta la forma de onda rectificada. En la salida de energía eléctrica del generador de alguna puede existir posibles pérdidas de energía, por ende, es necesario establecer parámetros para reducir la perdida de energía examinando la forma de onda rectificada.

Se realzo pruebas con un capacitor electrolítico de 1uF, este capacitor nos permite almacenar la carga eléctrica, generada por el generador eléctrico, lo cual nos permite controlar la carga y descarga del generador.

- **Circuito eléctrico TENG - en serie**

En este tipo de conexión, el generador triboeléctrico tiene una conexión, donde sus terminales de salida (positivo y negativo) por lo tanto, en este tipo de conexión se conecta de forma secuencial entre los generadores, estableciendo una interconexión en la que el cable de conexión positivo de salida de una unidad se enlaza con otro cable de conexión negativo de otro generador triboeléctrico. De esta manera, el voltaje producido por cada generador se acumula progresivamente a lo largo de la serie, lo que da como resultado un aumento del voltaje.

A diferencia de la configuración en paralelo, donde se incrementa la corriente de salida, en la conexión en serie la corriente se mantiene constante, equivalente a la generada por una sola unidad TENG.

- **Circuito eléctrico TENG – conexión en paralelo**

Estos dispositivos, se pueden conectar de manera paralela, para generar una salida de corriente más elevada, y a su vez están conectados en serie para aumentar su nivel de salida de voltaje. El circuito eléctrico esquemático de los generadores triboeléctricos como se puede observar está conectado de manera en serie como en paralelo.

La conexión serie es para aumentar su voltaje, mientras que la conexión del circuito en paralelo es para aumentar su corriente. Se refiere a un circuito equivalente que es desarrollado en el programa de Proteus, por lo tanto, se debe realizar de la forma correcta su circuito esquemático, por ende, si se utiliza el circuito equivalente. Este circuito equivalente además se puede también realizar una conexión en paralelo para una mayor salida de corriente, además que se puede realizar una conexión mixta, es decir una conexión para una mayor salida de voltaje y para una mayor salida de corriente.

# Conclusiones

1. Se analizaron diversos procesos, para mejorar las propiedades triboeléctricas de los materiales empleados en un generador triboeléctrico, estos procesos se basan en el mejoramiento de composición de las láminas dieléctricas. Se investigo que la modificación superficial, como el caso del aumento de la rugosidad, incorporación de recubrimiento metálicos, combinaciones entre materiales influyen significativamente en la capacidad de transferencia de carga triboeléctrica. Se demostró que la manipulación estratégica de los materiales triboeléctricos utilizados en el generador triboeléctrico es clave para mejorar su rendimiento.

2. Se seleccionaron materiales residuales con propiedades triboeléctricas adecuadas, basándose en la serie triboeléctrica donde se ha priorizado aquellos materiales que presentan una alta disponibilidad, biodegradabilidad, accesibilidad. De esta manera se seleccionó residuos plásticos compuestas por el polímero termoplástico PET, el polímero PVC y además en el residuo orgánico como el bagazo de caña de azúcar, los cuales poseen características favorables en la transferencia de carga eléctrica, debido a su afinidad electrónica. La selección cuidadosa de estos materiales permitió no solo mejorar el rendimiento del generador triboeléctrico, sino también fomentar el uso de residuos reciclables en aplicaciones tecnológicas, como en la generación de electricidad.

3. En el diseño de un mecanismo eficiente de recolección y almacenamiento de la carga producida por el generador triboeléctrico es esencial para aprovechar la energía producida por este dispositivo. Se utilizo como rectificador el uso de puente de diodos Schottky, debido a que tienen un nivel de caída de voltaje muy bajo en comparación a otros tipos de diodos, además se hizo uso de un capacitor electrolítico de 1uF. Transferir la carga de manera eficiente, minimizando las pérdidas y maximizando la potencia de salida. Es importante investigar y adaptar tecnologías de almacenamiento de energía adecuadas aspectos como la miniaturización y la integración de los sistemas de recolección y almacenamiento para aplicaciones portátiles y autónomas.

## Recomendaciones

El diseño de un generador triboeléctrico, conformado por materiales residuales es una innovadora manera para generar electricidad desde una perspectiva sostenible, con el medio ambiente. Sin embargo, debido a que el uso de esta nueva tecnología está en constante proceso de desarrollo, es necesario realizar combinaciones entre nuevos materiales, para maximizar la transferencia de carga eléctrica, optimizando el rendimiento del generador triboeléctrico.

## Referencias


[1] S. Montecinos Geisse y D. Carvajal Araneda, *Energías renovables: escenario actual y perspectivas futuras*. Editorial ebooks Patagonia - Editorial Universidad de La Serena, 2018. [En línea]. Disponible en: https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/190899

[2] A. Creus Sole, *Energías renovables*. Cano Pina, 2014. [En línea]. Disponible en: https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/43075

[3] P. Chévez, *Energías renovables y eficiencia energética: Análisis de medidas orientadas al sector residencial*. Nobuko/Diseño editorial, 2021.

[4] A. del Rio y N. Luna, *Como ves?: energías renovables: hacia la sustentabilidad*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2019. [En línea]. Disponible en: https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/187396

[5] L. Jarauta Rovira, *Las energías renovables*. Editorial UOC, 2015. [En línea]. Disponible en: https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/57883

[6] L. Vargas, J. Haas, y L. Reyes, *Generación de energía eléctrica con fuentes renovables*. Editorial Universitaria de Chile, 2020. [En línea]. Disponible en: https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/221694

[7] M. L. Ku, W. Li, Y. Chen, y K. J. Ray Liu, "Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, núm. 2, pp. 1384–1412, abr. 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2497324.

[8] A. Dabrowska y A. Greszta, “Analysis of the Possibility of Using Energy Harvesters to Power Wearable Electronics in Clothing”, 2019, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2019/9057293.

[9] A. J. Williams, M. F. Torquato, I. M. Cameron, A. A. Fahmy, y J. Sienz, “Survey of Energy Harvesting Technologies for Wireless Sensor Networks”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77493–77510, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083697.

[10] B. Sun, X. Guo, Y. Zhang, Z. L. Wang, y J. Shao, “A generalized model for a triboelectric nanogenerator energy harvesting system”, *Nano Energy*, vol. 126, p. 109637, jul. 2024, doi: 10.1016/J.NANOEN.2024.109637.

[11] V. Slabov, S. Kopyl, M. P. Soares dos Santos, y A. L. Kholkin, “Natural and Eco-Friendly Materials for Triboelectric Energy Harvesting”, el 1 de enero de 2020, *Springer*. doi: 10.1007/s40820-020-0373-y.

[12] Z. L. Wang, “From contact electrification to triboelectric nanogenerators”, *Reports on Progress in Physics*, vol. 84, núm. 9, p. 096502, 2021, doi: 10.1088/1361-6633/ac0a50.

[13] Z. L. Wang, J. Chen, y L. Lin, “Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors”, *Energy Environ Sci*, vol. 8, núm. 8, pp. 2250–2282, jul. 2015, doi: 10.1039/C5EE01532D.

[14] Z. L. Wang, “Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors”, el 26 de noviembre de 2013. doi: 10.1021/nn404614z.

[15] M. W. Williams, “Triboelectric charging of insulating polymers-some new perspectives”, *AIP Adv*, vol. 2, núm. 1, mar. 2012, doi: 10.1063/1.3687233.

[16] S. Pan y Z. Zhang, “Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review”, el 1 de febrero de 2019, *Tsinghua University Press*. doi: 10.1007/s40544-018-0217-7.

[17] S. A. Han, J. Lee, J. Lin, S. W. Kim, y J. H. Kim, “Piezo/triboelectric nanogenerators based on 2-dimensional layered structure materials”, *Nano Energy*, vol. 57, pp. 680–691, mar. 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.12.081.

[18] F. R. Fan, Z. Q. Tian, y Z. Lin Wang, “Flexible triboelectric generator”, *Nano Energy*, vol. 1, núm. 2, pp. 328–334, mar. 2012, doi: 10.1016/j.nanoen.2012.01.004.

[19] H. Zou *et al.*, “Quantifying the triboelectric series”, *Nat Commun*, vol. 10, núm. 1, dic. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09461-x.

[20] A. F. Diaz y R. M. Felix-Navarro, “A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties”, *J Electrostat*, vol. 62, núm. 4, pp. 277–290, nov. 2004, doi: 10.1016/j.elstat.2004.05.005.

[21] D. J. Lacks y R. Mohan Sankaran, “Contact electrification of insulating materials”, el 16 de noviembre de 2011. doi: 10.1088/0022-3727/44/45/453001.

[22] Z. Lin, W. Long, L. J. Chen, S. Niu, y Y. Zi, “Green Energy and Technology Triboelectric Nanogenerators”. [En línea]. Disponible en: http://www.springer.com/series/8059

[23] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, y Z. L. Wang, “Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era”, el 3 de enero de 2019, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/aenm.201802906.

[24] A. P. S. Prasanna, M. Anithkumar, y S. J. Kim, “Hybrid triboelectric nanogenerators: Revolutionizing the energy harvesting through material diversity and device architecture for different applications”, el 1 de diciembre de 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.nanoen.2024.110253.

[25] M. S. Cortizo, T. G. Oberti, y P. J. Peruzzo, “Introducción a la síntesis de polímeros”, *Libros de Cátedra*, 2023.

[26] Y. Zhang, Y. Zhou, Z. Wang, y J. Yan, “Colorless poly(amide-imide) copolymers for flexible display applications”, *J Appl Polym Sci*, vol. 139, núm. 44, p. e53082, nov. 2022, doi: 10.1002/APP.53082.

[27] M. J. Sanchis, M. Carsí, M. Culebras, C. M. Gómez, S. Rodriguez, y F. G. Torres, “Molecular dynamics of carrageenan composites reinforced with Cloisite Na+ montmorillonite nanoclay”, *Carbohydr Polym*, vol. 176, pp. 117–126, nov. 2017, doi: 10.1016/j.carbpol.2017.08.012.

[28] J. Rajesh Banu *et al.*, “A review on biopolymer production via lignin valorization”, el 1 de octubre de 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121790.

[29] Y. Song, Z. Shi, G. H. Hu, C. Xiong, A. Isogai, y Q. Yang, “Recent advances in cellulose-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators for energy harvesting: a review”, *J Mater Chem A Mater*, vol. 9, núm. 4, pp. 1910–1937, feb. 2021, doi: 10.1039/D0TA08642H.

[30] J. M. Lopez Romero, *Transformacion de materiales termoplasticos (UF0726)*. IC Editorial, 2015. [En línea]. Disponible en: https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/43780

[31] V. Fombuena Borras, *Caracterizacion de materiales polimericos*. Editorial de la Universidad Politecnica de Valencia, 2016. [En línea]. Disponible en: https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/57426

[32] R. Hinchet, W. Seung, y S. W. Kim, "Recent Progress on Flexible Triboelectric Nanogenerators for SelfPowered Electronics", el 1 de julio de 2015, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/cssc.201403481.

[33] F. R. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, y Z. L. Wang, "Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films", *Nano Lett*, vol. 12, núm. 6, pp. 3109–3114, jun. 2012, doi: 10.1021/nl300988z.

[34] W. Tang *et al.*, "Liquid-metal electrode for high-performance triboelectric nanogenerator at an instantaneous energy conversion efficiency of 70.6%", *Adv Funct Mater*, vol. 25, núm. 24, pp. 3718–3725, jun. 2015, doi: 10.1002/adfm.201501331.

[35] Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors - Principles, problems and perspectives", 2014, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/c4fd00159a.

[36] G. Min, Y. Xu, P. Cochran, N. Gadegaard, D. M. Mulvihill, y R. Dahiya, "Origin of the contact force-dependent response of triboelectric nanogenerators", *Nano Energy*, vol. 83, may 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.105829.

[37] Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors - Principles, problems and perspectives", 2014, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/c4fd00159a.

[38] W. G. Kim, D. W. Kim, I. W. Tcho, J. K. Kim, M. S. Kim, y Y. K. Choi, "Triboelectric Nanogenerator: Structure, Mechanism, and Applications", el 26 de enero de 2021, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acsnano.0c09803.

[39] Z. Shi *et al.*, "Triboelectric Nanogenerators: State of the Art", el 1 de julio de 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s24134298.

[40] I. Sobianin, S. D. Psoma, y A. Tourlidakis, "Recent Advances in Energy Harvesting from the Human Body for Biomedical Applications", el 1 de noviembre de 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15217959.

[41] S. Niu *et al.*, "Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source", *Energy Environ Sci*, vol. 6, núm. 12, pp. 3576–3583, dic. 2013, doi: 10.1039/c3ee42571a.

[42] J. Shao *et al.*, "Studying about applied force and the output performance of sliding-mode triboelectric nanogenerators", *Nano Energy*, vol. 48, pp. 292–300, jun. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.03.067.

[43] D. Godwinraj y S. C. George, "Recent advancement in TENG polymer structures and energy efficient charge control circuits", el 1 de enero de 2021, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.aiepr.2020.12.003.

[44] Y. Yang *et al.*, "Single-electrode-based sliding triboelectric nanogenerator for self-powered displacement vector sensor system", *ACS Nano*, vol. 7, núm. 8, pp. 7342–7351, ago. 2013, doi: 10.1021/nn403021m.

[45] S. Wang, Y. Xie, S. Niu, L. Lin, y Z. L. Wang, "Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human

motion in contact and non-contact modes", *Advanced Materials*, vol. 26, núm. 18, pp. 2818–2824, may 2014, doi: 10.1002/adma.201305303.

[46] S. M. S. Rana *et al.*, "Cation functionalized nylon composite nanofibrous mat as a highly positive friction layer for robust, high output triboelectric nanogenerators and self-powered sensors", *Nano Energy*, vol. 88, oct. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106300.

[47] T. Bhatta *et al.*, "High-performance triboelectric nanogenerator based on MXene functionalized polyvinylidene fluoride composite nanofibers", *Nano Energy*, vol. 81, mar. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105670.

[48] P. Mekbuntoon, W. Kaeochana, T. Prada, I. Appamato, y V. Harnchana, "Power Output Enhancement of Natural Rubber Based Triboelectric Nanogenerator with Cellulose Nanofibers and Activated Carbon", *Polymers (Basel)*, vol. 14, núm. 21, nov. 2022, doi: 10.3390/polym14214495.

[49] W. Yamklang, T. Prada, W. Bunriw, W. Kaeochana, y V. Harnchana, "Fe3O4-Filled Cellulose Paper for Triboelectric Nanogenerator Application", *Polymers (Basel)*, vol. 15, núm. 1, ene. 2023, doi: 10.3390/polym15010094.

[50] C. Yao, A. Hernandez, Y. Yu, Z. Cai, y X. Wang, "Triboelectric nanogenerators and power-boards from cellulose nanofibrils and recycled materials", *Nano Energy*, vol. 30, pp. 103–108, dic. 2016, doi: 10.1016/j.nanoen.2016.09.036.

[51] Q. Zhu *et al.*, "Biopolymer Materials in Triboelectric Nanogenerators: A Review", el 1 de mayo de 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/polym16101304.

[52] Z. L. Wang, “On Maxwell’s displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators”, el 1 de marzo de 2017, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.mattod.2016.12.001.

[53] R. Walden, C. Kumar, D. M. Mulvihill, y S. C. Pillai, “Opportunities and Challenges in Triboelectric Nanogenerator (TENG) based Sustainable Energy Generation Technologies: A Mini-Review”, *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 9, mar. 2022, doi: 10.1016/j.ceja.2021.100237.

[54] S. Narayanasamy, K. L. Chan, H. Cai, A. H. Bin Abdul Razak, B. K. Tay, y H. Miao, “Biobutanol production from sugarcane bagasse by Clostridium beijerinckii strains”, *Biotechnol Appl Biochem*, vol. 67, núm. 5, pp. 732–737, sep. 2020, doi: 10.1002/bab.1865.

[55] “Cómo se hacen las botellas de plástico: proceso de fabricación - Ecologia Cotidiana”. Consultado: el 16 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ecologiacotidiana.es/como-se-hacen-las-botellas-de-plastico-proceso-de-fabricacion/

[56] V. M. Orera y R. I. Merino, “Ceramics with photonic and optical applications”, *Boletin de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, vol. 54, núm. 1, pp. 1–10, ene. 2015, doi: 10.1016/j.bsecv.2015.02.002.

[57] “¿Qué es el PVC? - para qué sirve y donde se aplica”. Consultado: el 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://homeelectrico.com/plastico/que-es-el-pvc/

[58] “Cables conexión - Pidiscat”. Consultado: el 16 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://pidiscat.cat/es/fisica/cables-

conexion?srsltid=AfmBOoqXP0d3_ruBqhwbg0c-NQAHZtXcUeKG_dsWt-YaBdavgLzhWICJ

[59] A. López-Martínez *et al.*, “OBTENCIÓN DE CELULOSA A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR (Saccharum spp.) OBTAINING CELLULOSE FROM SUGAR CANE (Saccharum spp.) PULP”.

[60] L. Alesmar, N. Rendón, y M. E. Korody, “Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) - cemento”, *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 23, núm. 1, pp. 76–86, 2008, Consultado: el 17 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es

[61] “Reciclaje de botellas de plástico: Cuida el medio ambiente de forma sostenible • Renovables”. Consultado: el 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://renovables.blog/reciclaje/plastico/reciclaje-de-botellas-de-plastico/

[62] S. Niu *et al.*, “Simulation method for optimizing the performance of an integrated triboelectric nanogenerator energy harvesting system”, *Nano Energy*, vol. 8, pp. 150–156, 2014, doi: 10.1016/j.nanoen.2014.05.018.

[63] S. Niu y Z. L. Wang, “Theoretical systems of triboelectric nanogenerators”, *Nano Energy*, vol. 14, pp. 161–192, oct. 2014, doi: 10.1016/j.nanoen.2014.11.034.

[64] Z. L. Wang, L. Lin, J. Chen, S. Niu, y Y. Zi, “Triboelectric Nanogenerator: Vertical Contact-Separation Mode”, 2016, pp. 23–47. doi: 10.1007/978-3-319-40039-6_2.

[65] J. Peng, S. D. Kang, y G. J. Snyder, “A P P L I E D S C I E N C E S A N D E N G I N E E R I N G Optimization principles and the figure of merit for triboelectric generators”, 2017. [En línea]. Disponible en: http://advances.sciencemag.org/

[66] X. Cui, Y. Zhang, G. Hu, L. Zhang, y Y. Zhang, “Dynamical charge transfer model for high surface charge density triboelectric nanogenerators”, *Nano Energy*, vol. 70, abr. 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.104513.

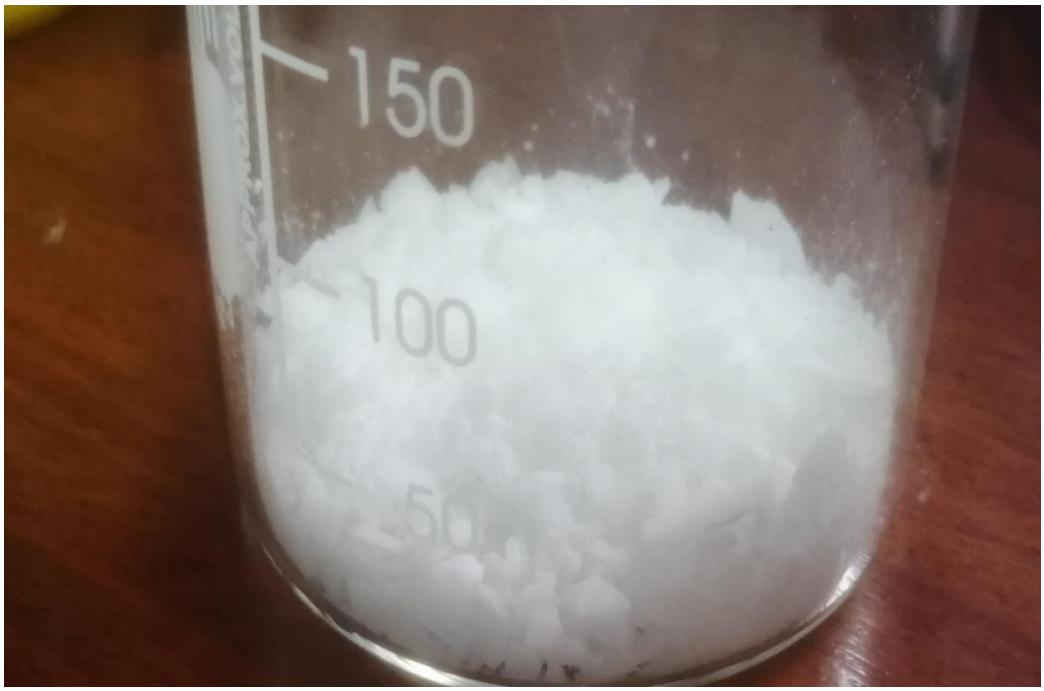
[67] J. M. Wu, C. K. Chang, y Y. T. Chang, “High-output current density of the triboelectric nanogenerator made from recycling rice husks”, *Nano Energy*, vol. 19, pp. 39–47, ene. 2016, doi: 10.1016/j.nanoen.2015.11.014.

# Anexos

**Anexo 1.** Residuo agrícola- bagazo caña.

**Anexo 2.** Cocción de la fibra caña-azúcar

**Anexo 3.** Hidróxido de potasio, en un vaso de precipitación.



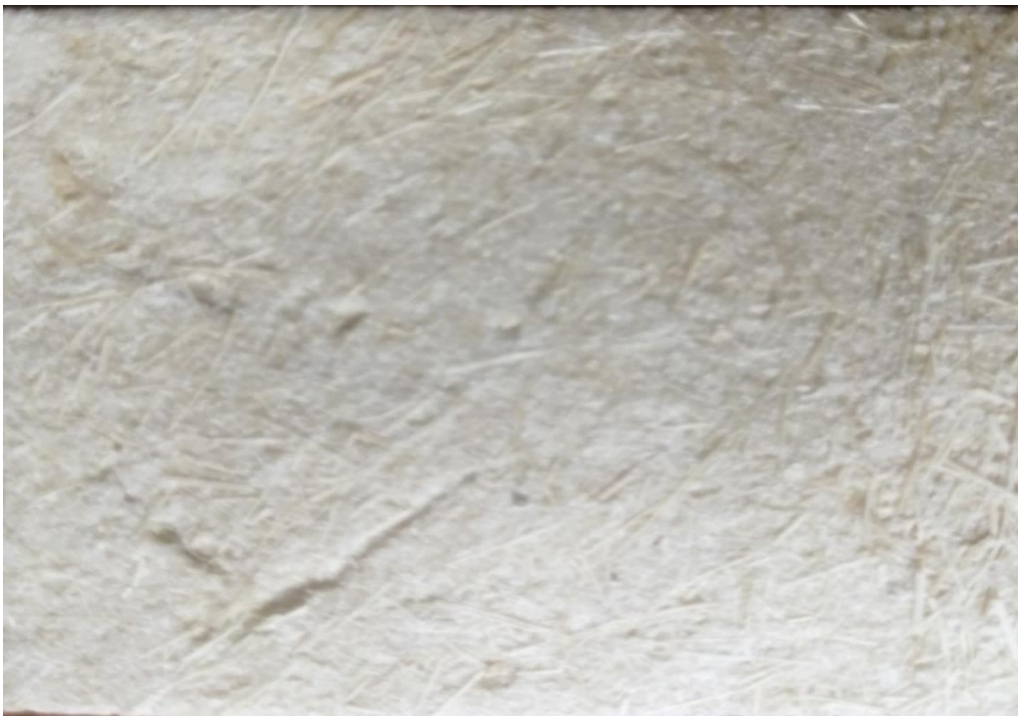

**Anexo 4.** Secado al aire libre, bagazo.

**Anexo 5.** Lámina de celulosa del residuo de las fibras de caña de azúcar.

**Anexo 6.** Blanqueamiento de la celulosa, aplicando peróxido de sodio.

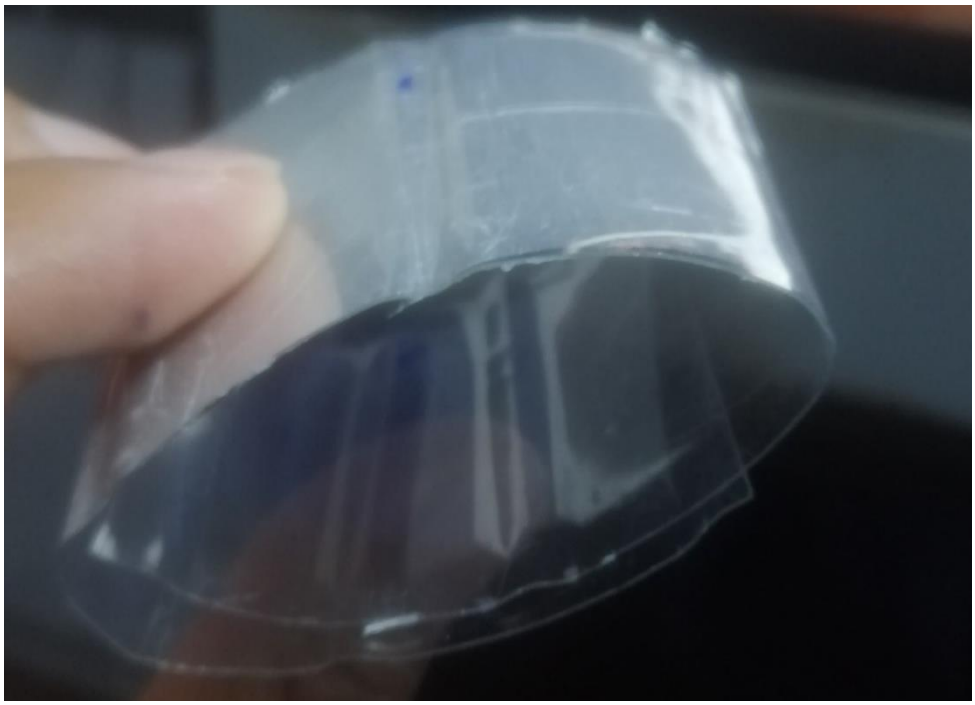
**Anexo 7**. Botellas plástica, procedentes después de su reciclaje.

**Anexo 8**. Material triboeléctrico papel de bagazo caña



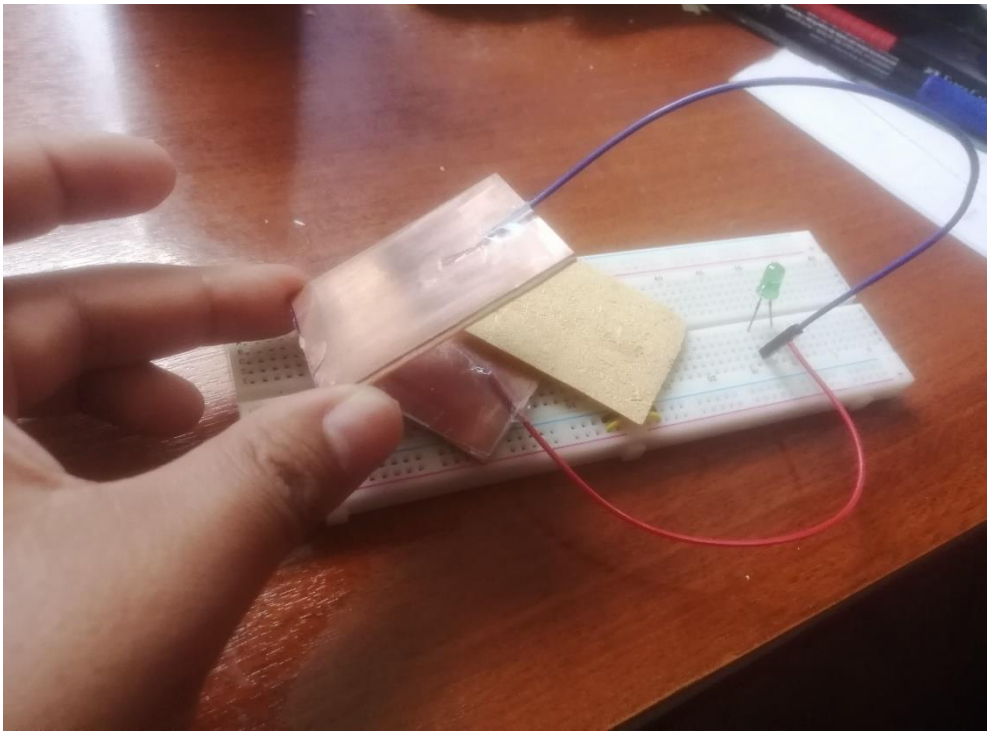
**Anexo 9.** Compuesto de celulosa caña de azúcar

**Anexo 10.** Electrodo aluminio, en el material PET.

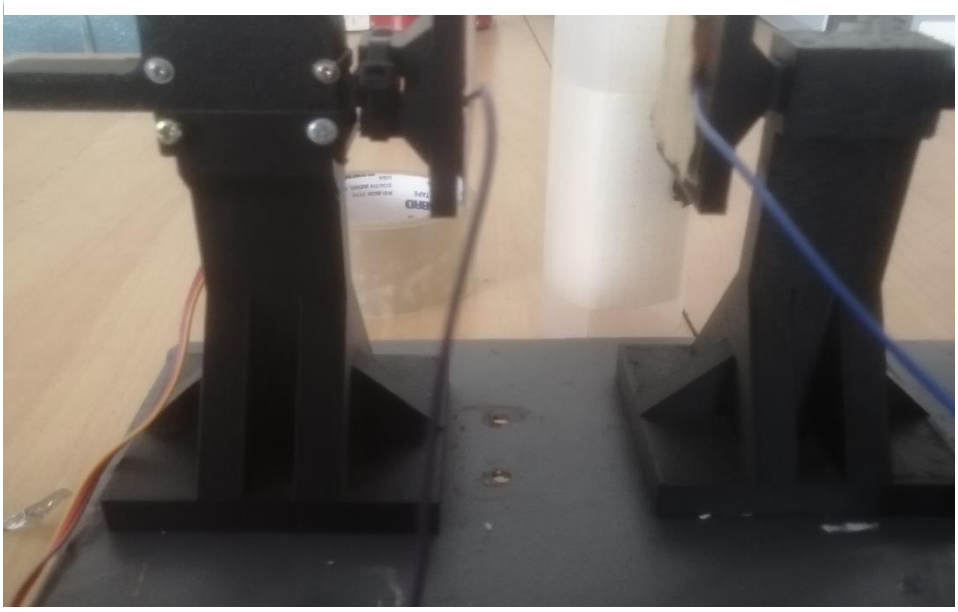


**Anexo 11**. Sistema de aplicación energía mecánica

**Anexo 12.** Prototipo generador triboeléctrico



**Anexo 13.** Sección ubicación láminas dieléctricas, del motor eléctrico lineal



**Anexo 14.** Lámina dieléctrico, luego de mezclar la celulosa y PET.