



UNIVERSIDAD  
DE LOS ANDES  
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO DE RECOLECTOR DE ENERGÍA QUE APROVECHA EL  
MOVIMIENTO HUMANO Y POR EFECTO TRIBOELÉCTRICO  
GENERA POTENCIA PARA APLICACIONES ESPECÍFICAS EN  
DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS MÓVILES.

Br. Nelly Susana Diaz Hernandez.

Mérida, Enero, 2021



UNIVERSIDAD  
DE LOS ANDES  
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE RECOLECTOR DE ENERGÍA QUE APROVECHA EL  
MOVIMIENTO HUMANO Y POR EFECTO TRIBOELÉCTRICO  
GENERA POTENCIA PARA APLICACIONES ESPECÍFICAS EN  
DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS MÓVILES.**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Electricista

Br. Nelly Susana Diaz Hernandez.

Tutor(es): Msc. Ana A. Arraiz B.

Mérida, Enero, 2021

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE RECOLECTOR DE ENERGÍA QUE APROVECHA  
EL MOVIMIENTO HUMANO Y POR EFECTO  
TRIBOELÉCTRICO GENERA POTENCIA PARA  
APLICACIONES ESPECÍFICAS EN DISPOSITIVOS  
ELECTRÓNICOS MÓVILES**

Br. Nelly Susana Diaz Hernandez.

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado

---

Prof. Francisco J. Vilorio M.

Jurado.

---

Prof. José Rafael Uzcategui.

Jurado.

---

Prof. Ana A. Arraiz B.

Tutor

## **AGRADECIMIENTOS**

A la ilustre Universidad de Los Andes y su Facultad de Ingeniería, por ser mi casa de estudios y aprendizaje, por abrir sus puertas como institución y dar la oportunidad de formar personas con actitudes virtuosas.

A mis padres y mi amigo Germán Salazar por el apoyo incondicional

A mi tutora Msc. Ana Arraiz por aceptar ser mi tutora y al profesor Francisco Vilorio por el apoyo brindado en el laboratorio

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**Br. Nelly Susana Diaz Hernandez. Diseño de recolector de energía que aprovecha el movimiento humano y por efecto triboeléctrico genera potencia para aplicaciones específicas en dispositivos electrónicos móviles.** Universidad de Los Andes. Tutor: Msc. Ana A. Arraiz B. Enero 2021

## **Resumen**

En el trabajo que a continuación se presenta se propone diseñar y construir un prototipo de sistema recolector de energía de baja potencia, que aproveche el movimiento que produce el ser humano, específicamente los brazos, para generar energía limpia y amigable con el medio ambiente. Este dispositivo basa su funcionamiento en la conjunción de dos fenómenos: la triboelectricidad y la inducción electrostática. Su utilidad está orientada a servir de fuente autónoma para dispositivos electrónicos móviles. Para alcanzar los objetivos que se plantearon, se vale decir, construir un prototipo eficiente, suficientemente validado, que logre sostener un suministro de corriente eléctrica a una carga de prueba, durante un tiempo determinado, se recurrió a material bibliográfico pertinente, de reciente data y pruebas en laboratorio para seleccionar los materiales dieléctricos y conductores adecuados, así como para definir los modelos estructurales del componente nanogenerador (Modelo 1 y Modelo 2) operando en dos modos de contacto-separación y fricción, los cuales se sometieron a ensayos de circuito abierto y de cortocircuito. Finalmente, con el propósito de tomar la decisión de seleccionar un solo prototipo, se consideró el rendimiento, su adecuación al lugar y la forma como debe operar, para tal efecto se realizaron pruebas con cargas resistivas y capacitivas. Una vez hecha la selección, el sistema recolector elegido fue puesto a prueba, comportándose de forma satisfactoria al poder encender un LED durante un tiempo aceptable, lo cual infiere que este prototipo puede ser capaz de energizar dispositivos como baterías de móviles u otros de baja potencia.

**Palabras clave:** Recolector de energía, triboelectricidad, inducción electrostática, contacto-separación, campo eléctrico, dieléctrico.

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>Capítulo</b>	<b>pp.</b>
<b>1 EL PROBLEMA</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Metodología.....	5
1.5 Alcance.....	6
1.6 Limitaciones.....	6
<b>2 TRIBOELECTRIFICACIÓN Y NANOGENERACIÓN</b>	<b>7</b>
2.1 Desarrollo histórico de la electrostática.....	7
2.2 Estructura del Átomo.....	10
2.3 Conducción eléctricas en los materiales.....	13
2.4 La generación de cargas electrostáticas.....	15

2.4.1	La generación de las cargas electrostáticas por contacto.....	15
2.4.2	La generación de las cargas electrostáticas por fricción.....	16
2.4.3	La generación de las cargas electrostáticas por inducción.....	17
2.5	Efecto triboeléctrico.....	18
2.6	Serie triboeléctrica.....	19
2.7	Colectores de energía.....	20
2.7.1	Clasificación de los colectores de energía.....	20
2.8	Cuantificación del efecto triboeléctrico.....	22
2.9	Nanogeneradores.....	24
2.10	Principios fundamentales de las modalidades para nanogeneradores triboeléctricos.....	25
2.10.1	Modo de separación de contacto vertical.....	26
2.10.2	Modo deslizante lateral.....	29
2.10.3	Modo de un solo electrodo.....	31
2.11	Comparación entre el NGTE y el NGTESE.....	32
2.12	Caso especial de nanogenerador.....	34
2.13	Capacitancia.....	36
2.14	Ultracapacitor.....	39
2.14.1	Ventajas y desventajas de los ultracapacitores.....	40
2.15	Características del dispositivo móvil.....	41
<b>3</b>	<b>SELECCIÓN Y FABRICACIÓN DE LOS NANOGENERADORES TRIBOELÉCTRICOS (NGTE)</b>	<b>43</b>
3.1	Selección de materiales.....	43
3.2	Selección de los modos de nanogeneración triboeléctrica.....	46
3.3	Fabricación de los nanogeneradores.....	46
3.3.1	Fabricación del NGTE electrodo adjunto (Modelo 1).....	46
3.3.2	Fabricación del NGTESE conductor a dieléctrico (Modelo 2).....	48
3.4	Arquitectura del sistema de recolector de energía por triboelectrificación.....	49

3.5	Ensayos del sistema en el laboratorio.....	50
3.5.1	Ensayo a circuito abierto del modelo 1 y modelo 2.....	50
3.5.2	Ensayo de corto circuito del modelo 1 y modelo 2.....	52
3.5.3	Ensayos con todo el sistema conectado del modelo 1 y modelo 2.....	58
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>62</b>
4.1	Análisis de los resultados .....	62
4.1.1	Ensayos a circuito abierto.....	62
4.1.2	Ensayos a corto circuito.....	63
4.1.3	Ensayos con todo el sistema conectado.....	64
4.1.4	Cálculo de la resistencia interna mediante capacitores.....	67
4.1.5	Diseño de un circuito con fines demostrativos.....	70
	CONCLUSIONES.....	72
	RECOMENDACIONES.....	74
	REFERENCIAS.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>pp</b>
	.
2.1 Máquina electrostática.....	8
2.2 Balanza de torsión de Coulomb.....	8
2.3 Máquina de Wimshurst .....	9
2.4 Generador de Van der Graff.....	10
2.5 Estructura del átomo.....	12
2.6 Comportamiento de los electrones en un material.....	14
2.7 Comportamiento de los electrones en los materiales aislantes, semiconductor y conductor.....	15
2.8 Electrificación por contacto.....	16
2.9 Electrificación por fricción.....	16
2.10 Electrificación por inducción.....	17
2.11 Diferentes fuentes de energía y sus respectivos transductores para su conversión a energía eléctrica .....	21
2.12 Diferencial de superficie (a) de carga (b).....	23
2.13 Los cuatro modos fundamentales de NGTE, a) El modo de separación por contacto vertical, b) El modo deslizante en el plano, c) El modo solo electrodo y d) El modo de capa triboeléctrica independiente.....	26
2.14 Proceso de generación de electricidad en un ciclo completo de NGTE para el modo de separación de contacto vertical a circuito abierto.....	26
2.15 Proceso de generación de electricidad en un ciclo completo de NGTE para el modo de separación de contacto vertical a cortocircuito.....	28

2.16	NGTE basado en la separación de cargas en el plano. Los bocetos ilustran el proceso de generación de electricidad en un ciclo completo del movimiento de deslizamiento en condiciones de casi corto circuito.....	30
2.17	Mecanismo de trabajo del NGTESE conductor a dieléctrico de electrodo único basado en separación de contacto vertical. Los bocetos ilustran el proceso de generación de electricidad en un ciclo completo, del movimiento de contacto en condiciones de cuasi cortocircuito.....	31
2.18	Comparación de NGTE y NGTESE.....	33
2.19	a) diagrama esquemático del NGTE modo de electrodo único de deslizamiento lateral. b) imagen SEM de la superficie de PTFE con estructura de nano-partículas grabadas. c) Imagen grabada de AFM de la superficie de PTFE.....	34
2.20	Rendimiento de la salida eléctrica del NGTE deslizante basado en un solo electrodo. a) Voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) y la densidad de corriente de cortocircuito ( $J_{SC}$ ) del NGTE b) 100 LED verdes comerciales controlados directamente por el NGTE bajo un movimiento deslizante.....	35
3.1	a) Péndulo artesanal y b) materiales seleccionados.....	43
3.2	Electroscopio.....	44
3.3	Detección de la carga en el electroscopio de los materiales cuero y acrílico.....	45
3.4	Detección de la carga en el electroscopio de los materiales cuero y acetato.....	45
3.5	Instrumentos de medida a) tornillo micrométrico y b) regla.....	47
3.6	Fabricación del modelo 1 a) vista superior y b) vista lateral.....	48
3.7	Fabricación del modelo 2 a) vista superior y b) vista lateral.....	49
3.8	Arquitectura del sistema de recolector de energía de los dos modelos a) Modelo 1 b) Modelo 2.....	50
3.9	Circuito equivalente a OC.....	50
3.10	Ensayo de circuito abierto por contacto de ambos modelos a) modelo 1 b) modelo 2	51
3.11	Ensayo de circuito abierto por fricción de ambos modelos a) modelo 1 b) modelo 2	52
3.12	Circuito equivalente a CC.....	52
3.13	Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 1 con varias resistencias a) R= 20 k $\Omega$ , b) R= 50 k $\Omega$ , c) R= 100 k $\Omega$ , d) R= 500 k $\Omega$ .....	53
3.13	Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 1 con varias resistencias e) R= 800 k $\Omega$ , f) R= 18 M $\Omega$ y g) R= 36 M $\Omega$ (Continuación).....	54

3.14	Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 2 con varias resistencias a) R= 20 k $\Omega$ , b) R= 50 k $\Omega$ .....	54
3.14	Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 2 con varias resistencias c) R= 100 k $\Omega$ , d) R=500 k $\Omega$ , e) R=800 k $\Omega$ , f) R=18 M $\Omega$ y g) R= 36 M $\Omega$ (Continuación)	55
3.15	Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 1 con varias resistencias a) R= 20 k $\Omega$ , b) R= 50 k $\Omega$ , c) R= 100 k $\Omega$ , d) R= 500 k $\Omega$ , e) R= 800 k $\Omega$ , f) R= 18M $\Omega$ .....	56
3.15	Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 1 con varias resistencias g) R= 36 M $\Omega$ (Continuación).....	57
3.16	Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 2 con varias resistencias a) R= 20k $\Omega$ , b) R= 50 k $\Omega$ , c) R= 100 k $\Omega$ , d) R= 500 k $\Omega$ .....	57
3.16	Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 2 con varias e) R=800 k $\Omega$ , f) R= 18 M $\Omega$ y g) R= 36 M $\Omega$ (Continuación).....	58
3.17	Todo el sistema conectado.....	58
3.18	Ensayo con todo el sistema conectado por contacto del modelo 1 con varios capacitores a) C= 2,2 $\mu$ F, b) C= 4,7 $\mu$ F, c) C= 10 $\mu$ F y d) C= 47 $\mu$ F.....	59
3.19	Ensayo con todo el sistema conectado por contacto del modelo 2 con varios capacitores a) C= 2,2 $\mu$ F, b) C= 4,7 $\mu$ F, c) C= 10 $\mu$ F y d) C= 47 $\mu$ F.....	60
3.20	Ensayo con todo el sistema conectado por fricción del modelo 1 con varios capacitores a) C= 2,2 $\mu$ F, b) C= 4,7 $\mu$ F.....	60
3.20	Ensayo con todo el sistema conectado por fricción del modelo 1 con varios capacitores c) C= 10 $\mu$ F y d) C= 47 $\mu$ F (Continuación).....	61
3.21	Ensayo con todo el sistema conectado por fricción del modelo 2 con varios capacitores a) C= 2,2 $\mu$ F, b) C= 4,7 $\mu$ F, c) C= 10 $\mu$ F y d) C= 47 $\mu$ F.....	61
4.1	Corriente, del modelo 1 y 2 por contacto.....	63
4.2	Corriente, del modelo 1 y 2 por fricción.....	64
4.3	Carga, del modelo 1 y 2 por contacto.....	65
4.4	Carga, del modelo 2 por contacto.....	65
4.5	Carga, del modelo 1 y 2 por fricción.....	66
4.6	Carga, del modelo 2 por fricción.....	66
4.7	Descarga del capacitor 1.....	67
4.8	Descarga del capacitor 2.....	68

4.9	a) Voltaje a circuito abierto y b) Voltaje luego de muchas fricciones.....	70
4.10	Esquema del circuito demostrativo.....	70
4.11	a) Circuito equivalente, b) Circuito equivalente de Thevenin visto desde el capacitor para obtener el tiempo de carga del capacitor y c) Circuito equivalente de Thevenin visto desde el capacitor para obtener el tiempo de descarga del capacitor.....	71

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>pp.</b>
2.1	Características del átomo.....	11
2.2	Materiales de la serie triboeléctrica.....	19
2.3	Requerimientos eléctricos de los dispositivos móviles.....	41
3.1	Detección de la carga en los distintos materiales en grados.....	46
3.2	Parámetros utilizados para el modelo 1.....	47
3.3	Parámetros utilizados para el modelo 2.....	49
4.1	Carga del capacitor 4700 $\mu$ F.....	69

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# INTRODUCCIÓN

La primera modalidad de electricidad producida por el hombre es la electricidad estática y ya fue referida por el filósofo griego Tales de Mileto hacia el año 600 a.C, descubrió una materia, el ámbar, cuyo nombre en griego es electrón, que al ser frotado con una tela era capaz de atraer cosas muy ligeras, la cual la definió como una carga estacionaria.

En lo que se considera un salto tecnológico importante, en 1660 el físico alemán Otto von Guericke, construyó la primera máquina electrostática capaz de producir triboelectricidad. Un siglo más tarde, el físico francés *Charles Coulomb* en 1785, publicó un tratado en el que se describían cuantitativamente por primera vez las fuerzas eléctricas. Entre 1880 y 1883 el británico James Wimshurst crea una máquina que es un generador electrostático de alto voltaje. Luego en 1929 el físico Robert J. Van der Graff crea una máquina electrostática

En la actualidad la generación de energía está pasando por un momento crítico, debido a su déficit y que su creación genera un impacto en el ambiente. Esto ha orientado a los investigadores hacia el estudio de fuentes alternas que aprovechen las diferentes formas que se encuentra en el ambiente como las energías provenientes en el viento, la luz solar, las corrientes hidráulicas y otras más. A medida que transcurre el tiempo se construyen más dispositivos que funcionan con energía eléctrica y últimamente se ha generalizado su uso masivo y su portabilidad tanto en la comunicación, el entretenimiento, la biomedicina y en gran parte por las actividades comunes que realiza el hombre.

Una alternativa plausible para solventar estos problemas los constituye los colectores de energía, que son diseños para aprovechar cualquier tipo de energía existente en el ambiente, que en otra forma se desperdiciaría y convertirla en energía eléctrica con la ventaja de su total autonomía de fuentes convencionales.

En este trabajo se propone la construcción de un colector de energía que aproveche el movimiento mecánico del cuerpo en este caso de los brazos del cuerpo humano para accionar un generador que funcione bajo el principio de la triboelectricidad e inducción electrostática. El presente trabajo; en primer lugar, se desarrolló un profundo estudio de los fenómenos físicos a analizar y en segundo lugar se desarrollaron una serie de procesos físicos experimentales. Este trabajo se ha basado en las investigaciones de la última década de los llamados nanogeneradores triboelectricos (NGTE).

El desarrollo del presente trabajo de grado será efectuado de la siguiente manera:

**En el Capítulo 1**, se realiza el planteamiento del problema, se trazan los objetivos, se plantea la metodología, justificación, sus alcances y sus limitaciones.

**En el Capítulo 2**, se plantea el marco teórico de la investigación, en la que se describen, el desarrollo histórico, la generación de cargas electrostáticas, conducción eléctrica en metales, aislantes y semiconductores, colectores de energía, efecto triboeléctrico, serie triboeléctrica, cuantificación del efecto triboeléctrico, nanogeneradores y principios fundamentales de las modalidades para nanogeneradores triboeléctricos (NGTE).

**En el Capítulo 3**, se seleccionan los materiales, se elegirá los modos de los nanogeneradores y se detallará el desarrollo de la fabricación de los nanogeneradores.

**En el Capítulo 4**, en este capítulo se analizará los resultados de cada uno de los ensayos desarrollados en el laboratorio: circuito abierto, corto circuito y todo el sistema conectado.

# **CAPÍTULO I**

## **PUEDE EL EFECTO TRIBOELÉCTRICO GENERAR POTENCIA PARA APLICACIONES EN DISPOSITIVOS ELECTRONICOS?**

El presente capítulo se describe las bases necesarias para responder esta interrogante y permite crear las condiciones del proyecto, donde se expresa el planteamiento del problema, la justificación, objetivos, la metodología, el alcance y las limitaciones.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los recursos energéticos renovables ofrecen fuentes de energía limpia, inagotable y crecientemente competitiva. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero causantes del cambio climático ni emisiones contaminantes [1].

Sin duda alguna, debido al auge tecnológico ocurrido en el mundo en las últimas décadas, se construyen con mayor frecuencia dispositivos que funcionan con electricidad. Debido a esto, la energía eléctrica ha desempeñado un rol muy importante en la modernización tanto a nivel personal como social.

La masificación de estas tecnologías y al tener características de portabilidad en el campo de las comunicaciones, la recreación, la biomedicina y en otros usos de la vida diaria que realiza el ser humano, ha presionado a la necesidad de recurrir a nuevas fuentes de energía no

convencionales que nos permitan operar estos dispositivos inteligentes portátiles en cualquier circunstancia y que causen un impacto ecológico positivo.

Esta necesidad se origina debido a que estos dispositivos móviles se utilizan también en lugares remotos o apartados de los centros urbanos, en donde sí se disponen de fuentes convencionales de energía, haciendo difícil la autonomía de funcionamiento de estos equipos. Utilizando como ejemplo el caso de una persona que quiera hacer ejercicios en la montaña, no va a tener a la mano una fuente de energía eléctrica directa por medio de una toma convencional tal como existe en la ciudad, con el propósito de cargar su teléfono para poder comunicarse en caso de cualquier emergencia que se le presente. Por lo tanto, obliga a buscar como alternativa la autogeneración para cargar estos dispositivos móviles utilizando el movimiento humano.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se enfoca en darle especial importancia al uso de las energías limpias y renovables, las cuales brindan una opción adecuada a los tiempos actuales y por venir, ya que ella posee múltiples beneficios debido a que su empleo reduce el impacto ecológico que resulta de la utilización de combustibles fósiles.

Cada día se va incrementando la población mundial y consecuentemente con esto, aumentan los dispositivos electrónicos que se usan para mejorar la calidad de vida. Debido a esto, va en aumento la demanda de la energía eléctrica, la cual se debe satisfacer de una manera sostenible y para ello obliga a disponer de nuevas tecnologías de generación.

Dado que, gran parte de la población está familiarizada con el uso de equipos portables como celulares, *tablet* entre otros y que a medida que transcurre el tiempo su número va en aumento, implementar este sistema de recolector de energía, para mantener energizado estos equipos móviles en caso de emergencia es lo ideal, además es capaz de generar limpiamente carga por medio del efecto triboeléctrico, aportaría un notable avance al cuidado del planeta, contribuyendo a reducir el calentamiento global y abre las puertas a futuras investigaciones en la Universidad y en el país, en la perspectiva de mejorar este tipo de energía de pequeña escala

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. General**

Diseñar un recolector de energía que aprovecha el movimiento humano y por efecto triboeléctrico genera potencia para aplicaciones específicas en dispositivos electrónicos móviles.

### **1.3.2. Específicos**

- Investigar y analizar el marco teórico referente a la generación de energía por efecto triboeléctrico.
- Construir un detector de cargas electrostática para probar los materiales seleccionados según la serie triboeléctrica.
- Diseñar la arquitectura del dispositivo generador.
- Ensamblar el dispositivo de acuerdo al diseño.
- Medir los parámetros eléctricos a circuito abierto y en corto circuito y análisis de sus resultados.

## **1.4. METODOLOGÍA**

El desarrollo parte de una investigación bibliográfica, para seleccionar los materiales óptimos, en la aplicación se estudiará la teoría del efecto triboeléctrico y los nanogeneradores triboeléctricos.

Este trabajo se llevará a cabo mediante una investigación experimental para obtener información que permitan construir un recolector de energía, se realizan experimentos de ensayos a circuito abierto (CA) para obtener el voltaje y ensayos a cortocircuito (CC) para adquirir la corriente, en el laboratorio con ayuda de un osciloscopio digital y otros equipos necesarios a utilizar, finalmente analizar los resultados y obtener conclusiones.

## **1.5. ALCANCE**

Partiendo de la revisión bibliográfica, se realiza una selección más idónea de los materiales que son accesibles, construir un prototipo de recolección de carga, realizar las pruebas de laboratorio CC y CA con el fin de seleccionar la configuración más acertada y finalmente complementar el recolector de carga eléctrica para encender un led

## **1.6. LIMITACIONES**

La disponibilidad de materiales de alta tecnología, por ejemplo, polímeros procesados específicamente para potenciar su capacidad triboeléctrica.

Carencia de módulos de generación y medición de energía mecánica que simulen el movimiento humano.

Se trabajó en ambientes no controlados (humedad, polución y entre otros).

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# CAPÍTULO II

## TRIBOELECTRIFICACIÓN Y NANOGENERACIÓN

En este capítulo se aborda el desarrollo teórico mostrando un breve análisis histórico, donde se explica el origen del estudio del fenómeno electrostático, como lo fue la maquina electrostática creada por Otto Von Guericke, para luego abordar brevemente la conducción eléctrica en los materiales como los aislantes, conductores y semiconductores. Posteriormente se refiere al efecto triboeléctrico y el listado de la serie triboeléctrica, que se basa en los distintos materiales y la capacidad que tienen de ganar o perder electrones. Además se explica la clasificación de los colectores de energía, para luego analizar las diferentes modalidades de los nanogeneradores triboeléctricos.

### 2.1. DESARROLLO HISTÓRICO DE LA ELECTROSTÁTICA

La primera modalidad de electricidad producida por el hombre es la electricidad estática y ya fue referida por el filósofo griego Tales de Mileto hacia el año 600 a.C, descubrió una materia, el AMBAR, cuyo nombre en griego es ELECTRON, que al ser frotado con una tela era capaz de atraer cosas muy ligeras, la cual la definió como una carga estacionaria [2]. La investigación científica sobre este fenómeno comenzó cuando en 1600, el inglés William Gilbert (medico) clasifica la materia en dos grupos, los que llamaba eléctricos por producir atracciones eléctricas, y que hoy son los que llamamos aisladores o dieléctricos y los no eléctricos que son los conductores [2].

En lo que se considera un salto tecnológico importante, en 1660 el físico alemán Otto von Guericke, construyó la primera máquina electrostática capaz de producir triboelectricidad. Es de notar que esta máquina estaba conformada por una bola de azufre (material aislante) la cual

la hacía girar con una mano y la frotaba con la otra, de tal forma que la esfera podía mantener una gran cantidad de carga y que se descargaba acercándole el extremo de un conductor [3]. La importancia de esto reside en que, con la bola de azufre cargada, Von Guericke observó una serie de manifestaciones que hoy se relacionan a la electricidad estática, tales como chispas, chisporroteos, atracción y repulsión de objetos livianos. Posteriormente notó que, en ocasiones al rotar la esfera se producía un halo, el cual no pudo comprender ya que el brillo que observó era electroluminiscencia, fenómeno debido a la conversión de energía eléctrica en luz.



**Figura 0.1 Maquina electrostática [3]**

Un siglo más tarde, el físico francés Charles Coulomb en 1785, publicó un tratado en el que se describían cuantitativamente por primera vez las fuerzas eléctricas y se formularon las leyes de atracción y repulsión de cargas eléctricas estáticas, además se realizaron mediciones utilizando la balanza de torsión, la cual se muestra en la Figura 0.2.

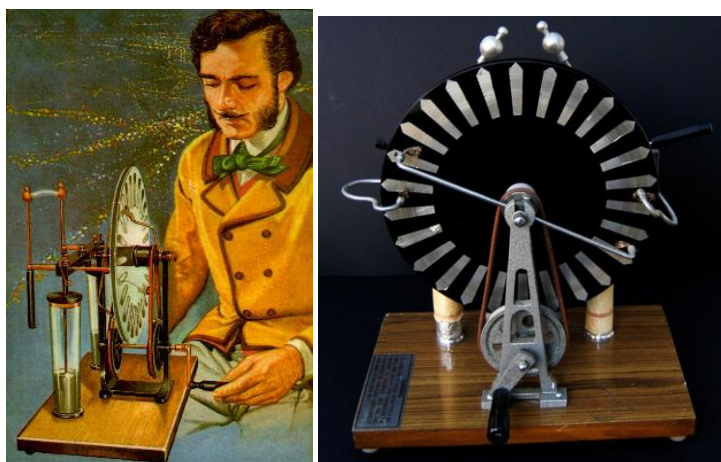


**Figura 0.2 Balanza de torsión de Coulomb, utilizada para determinar la ley del cuadrado inverso para una fuerza eléctrica entre dos cargas [3]**

La balanza de torsión mencionada anteriormente está conformada por dos bolas de metal sujetas por los dos extremos de una barra suspendida por un cable, filamento o chapa delgada. Para medir la fuerza electrostática se puede poner una tercera bola cargada a una cierta distancia. Las dos bolas cargadas se repelen o atraen unas a otras, causando una torsión de un cierto ángulo. De esta forma se puede saber cuánta fuerza, en newton, es requerida para torsionar la balanza un cierto ángulo [3].

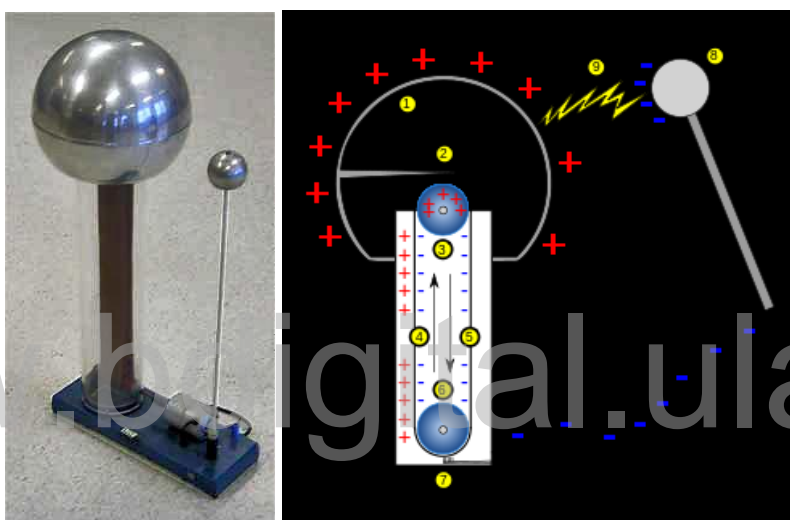
Otro aspecto histórico a considerar y que es de gran relevancia es el hecho que en 1827 Georg Ohm establece la relación entre voltaje y la corriente en un hilo conductor. André-Marie Ampere en 1829, con su ley define el campo magnético creado por la corriente eléctrica, luego más tarde Gustav Kirchhoff establece los llamados lemas de nodos y de mallas empleados para la resolución de circuitos eléctricos. Heinrich Hertz en 1842 genera ondas electromagnéticas de alta frecuencia, a las que hoy se les denomina ondas hertzianas y estudio los rayos catódicos, con los que en 1845 Wilhelm Röntgen descubrió los rayos X [2].

Cabe considerar que entre 1880 y 1883 el británico James Wimshurst crea una máquina que es un generador electrostático de alto voltaje. Tiene un aspecto distintivo con dos grandes discos a contra-rotación (giran en sentidos opuestos) montados en un plano vertical, dos barras cruzadas con cepillos metálicos, y dos esferas de metal separadas por una distancia donde saltan las chispas. Se basa en el efecto triboeléctrico, en el que se acumulan cargas cuando dos materiales distintos se frotan entre sí, tal como se muestra en la Figura 2.3 [4].



**Figura 2.3. Máquina de Wimshurst [4].**

Luego en 1929 el físico Robert J. Van der Graff crea una máquina electrostática que consiste en una cinta transportadora de material aislante motorizada, que transporta carga a un terminal hueco. La carga es depositada en la esfera por inducción en la cinta, ya que la varilla metálica o peine, está muy próxima a la cinta pero no en contacto. La carga transportada por la cinta, pasa al terminal esférico nulo por medio de otro peine o varilla metálica que se encarga de producir energía, esto hace que las partículas o moléculas de energía que se encuentran dentro de la esfera al hacer contacto con otro cuerpo similar (que produzca energía) absorba a aquella produciendo electricidad estática en el cuero capilar, tal como se muestra en la Figura 2.4 [4].



**Figura 2.4. Generador de Van der Graff [4].**

Ahora bien, para comenzar entender más a fondo este fenómeno, es necesario estudiar la naturaleza intrínseca en los materiales, la cual tiene que ver con su estructura atómica.

## 2.2 ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

Debido a diversos experimentos químicos, se supo que una materia que contuviera varios elementos simples se podía descomponer en sus mínimas porciones que son las denominadas moléculas. Pero a su vez una molécula está constituida por varias partículas correspondientes a los elementos simples que la forman, ellas son el átomo de un elemento simple [5].

En 1897 Joseph John Thomson, mediante su estudio de los rayos catódicos descubre el electrón y en 1904 propone una primera estructura del átomo considerándolo construido por

una esfera de carga eléctrica positiva dentro del cual se encuentran los electrones que son de carga negativa [5].

En 1911 Ernest Rutherford lo describe que contiene un núcleo central con carga positiva y está rodeado por una corteza de partículas con carga negativa, que son los electrones girando alrededor del núcleo y que poseen el mismo número de cargas positivas en el núcleo a las negativas de la corteza, de forma que eléctricamente el átomo es neutro [5].

Después Bohr establece una estructura donde los electrones giran alrededor del núcleo sobre órbitas circulares. Luego Arnold Sommerfeld propone la estructura con orbitas elípticas su explicación ese través de la mecánica cuántica, de esta manera surgen en el electrón dos números cuánticos, el principal  $n$  de Bohr y el secundario  $l$  de Sommerfeld [5].

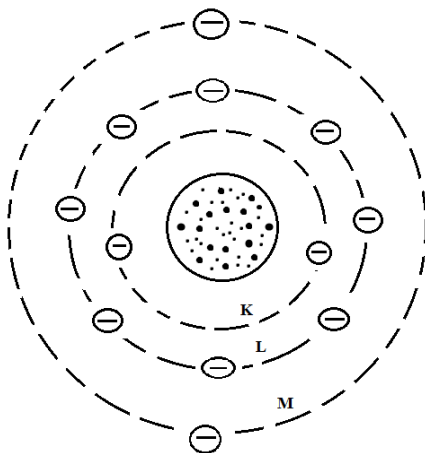
Hoy en día sabemos que el núcleo contiene, dos tipos de partículas, el protón y el neutrón. El protón tiene una masa 1836 veces mayor que la del electrón, pero su carga eléctrica es igual a la de este, aunque positiva. En cambio, el neutrón, tiene casi la misma masa que el protón y no tiene carga.

**Tabla 2.1 Características del átomo [5].**

<b>Partícula</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Carga (C) <math>\times 10^{19}</math></b>	<b>Masa (Kg) <math>\times 10^{27}</math></b>
Protón	P	1,601864	1,67239
Electrón	E	-1,601864	$9,11083 \times 10^{-4}$
Neutrón	n	0	1,6747

En la tabla 2.1 se observa los valores para la carga ( $q$ ) y la masa ( $m$ ) de las partículas que constituyen el átomo, la carga en coulombs y la masa en kilogramos según el SI.

La representación gráfica del átomo se hace como en la Figura 2.5



**Figura 2.5 Estructura del átomo [5].**

Donde esta figura se representa al átomo de magnesio Mg que tiene 12 electrones, 12 protones y 12 neutrones, estos protones y neutrones contenidos en el núcleo que es el círculo con perímetro continuo. Pero las otras circunferencias no son órbitas de los electrones, que también pueden ser elípticas, sino que indican los denominados “niveles de energía primaria”. Estas pueden ser hasta 7, que se les denomina K, L, M, N, O, P y Q aunque normalmente no se pasa a un nivel superior sin haber previamente llenado los anteriores y por mecánica cuántica se sabe que el número máximo de electrones permitido en un nivel o capa viene dado por la expresión [5].

$$n_e = 2n^2 \quad (0.1)$$

Donde  $n$  es el número cuántico principal asociado que le corresponde a la capa, que es  $n=1$  para K,  $n=2$  para L,  $n=3$  para M etc. Teniendo que ser  $n \leq 4$

Cada nivel, en general, puede tener hasta cuatro subniveles, que tienen las dimensiones s, p, d, f y en cada uno de estos subniveles de energía, secundarios puede haber un número máximo de electrones que viene dado por la expresión [5].

$$l_e = 2(2l + 1) \quad (0.2)$$

Donde  $l$  es el número cuántico orbital asociado con el movimiento angular del electrón. Teniendo que ser  $0 \leq l \leq n-1$  y  $l \leq 3$

Existe un pequeño tercer nivel de energía debido al momento magnético del electrón circulando en su órbita y ello hace que en la cuántica se defina el número cuántico orbital magnético denominado  $m_l$ , sin embargo dicha teoría nos indica que debe ser [5].

$$-l \leq m_l \leq l \quad (0.3)$$

Por último, Uehlenbeck y Goudsmit descubrieron que el electrón tiene un movimiento de rotación sobre sí mismo, creando un cuarto nivel de energía. La rotación puede ser en sentido de las agujas del reloj o contrario, este movimiento es lo que se llama “el espín” del electrón y en mecánica cuántica se origina así un cuarto número cuántico [5].

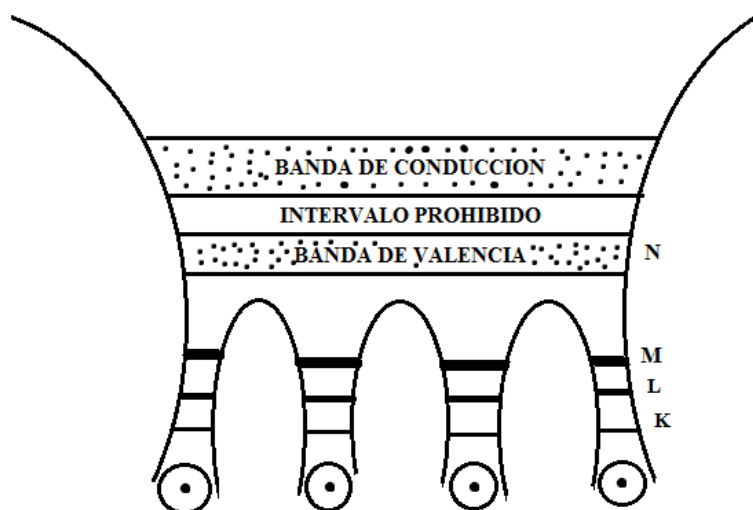
$$m_s = \pm \frac{1}{2} \quad (0.4)$$

Se debe conocer también que la capa de valencia (o externa) no puede tener un número mayor de 8 electrones y que a los elementos que tienen pocos electrones en la capa externa, con aplicación de poca energía, es fácil conseguir la extracción de uno o más electrones de dicha capa, y al perder electrones queda el átomo electrificado positivamente, en cambio, cuando la capa externa tiene un número elevado de electrones, por ejemplo 6, es más fácil añadir a dicha capa uno o más electrones, quedando entonces el átomo electrificado negativamente [5].

Esto aclara porque se realizan los enlaces moleculares entre dos elementos cuyas capas externas sean, la de uno con pocos y la del otro con muchos electrones. Y lo mismo, por qué los gases nobles, que tienen toda su capa externa con 8 electrones no se pueden enlazar molecularmente con ningún otro elemento. A continuación, se detallara a profundidad el comportamiento de la conducción eléctrica en los materiales conductores, semiconductores y aislantes.

### 2.3 CONDUCCIÓN ELECTRICAS EN LOS MATERIALES

Se explicará cómo se comportan los electrones en un material en la figura 2.6

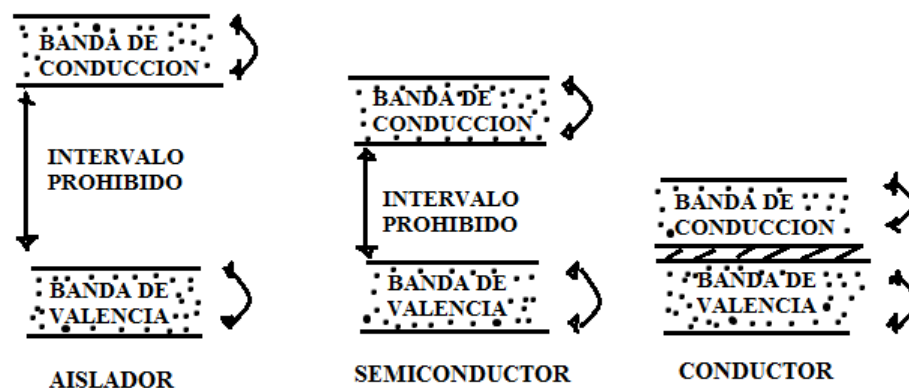


**Figura 2.6 Comportamiento de los electrones en un material [6]**

En esta Figura 2.6 se representa cuatro átomos de un elemento en estado sólido, normalmente constituyendo un cristal y al mismo tiempo, simbólicamente, se representa sus distintas capas de energía, que en la figura son K, L, M y N. La banda de valencia (N) se observa común para todos los átomos cercanos. Esto es porque el enlace atómico es por covalencia, que es un enlace que se caracteriza por el compartimiento de pares de electrones por los átomos que forman la molécula. Para hacer pasar un electrón de un nivel (o subnivel) a otro superior hay que suministrarle energía, pero cuando este en la banda de valencia y se realice tal suministro de energía, si no tiene nivel (o subnivel) superior, en este caso el electrón ha caído en la denominada banda de conducción [6].

Dentro de este orden de ideas, a continuación, en la Figura 2.7 se puede comprender el comportamiento de los electrones en los materiales aislantes, conductores y semiconductores

En el aislador (dieléctrico), que tiene casi completa la banda de valencia (un número de electrones cercano a 8), hay un gran intervalo entre dicha banda y la siguiente que es la de conducción. Debido a ese gran intervalo se necesita suministrar mucha energía a un electrón de la banda de valencia para que salte a la banda de conducción. Por eso, estando el aislador en condiciones normales, encontramos muy pocos electrones libres en su banda de conducción.



**Figura 2.7 Comportamiento de los electrones en los materiales aislantes, semiconductor y conductor [6].**

En cambio, en el conductor la banda de valencia se encuentra solapada con la de conducción, lo que implica un fácil paso de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción por lo que ésta, al contrario de antes, contiene ahora muchos electrones libres [6].

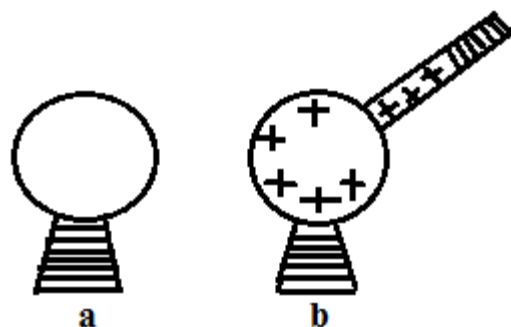
Y por último los semiconductores, la diferencia con los aisladores es que como se muestra en la Figura 2.7 el intervalo prohibido es mucho menor que el de un aislador, lo que permite que en ellos se encuentran más electrones libres que en los aisladores [6].

Dada las definiciones anteriores permitirán comprender mejor la electrificación, a continuación se hará un análisis del proceso de los distintos tipos de generación de cargas electrostáticas.

## 2.4 LA GENERACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS

La electrificación se puede producir por contacto, frotamiento e inducción de dos materiales.

**2.4.1 La generación de cargas electrostáticas por contacto,** este proceso se puede observar en la Figura 2.8



**Figura 2.8 electrificación por contacto [7]**

En esta Figura se muestra una esfera metálica apoyada en una base aisladora y en estado neutro, tal como se puede observar en la Figura 2.8a. Luego, como se muestra en la Figura 2.8b, al acercar a esta esfera, una varilla cargada positivamente (lo cual significa que la varilla tiene déficit de electrones), debido a esto, al acercar la varilla a cualquier material, en este caso la esfera, buscara el equilibrio eléctrico y consecuentemente con esto generará un campo eléctrico que movilizara a los electrones de la esfera hacia la varilla, dejando la esfera con déficit de electrones, es decir con carga neta positiva [7].

**2.4.2 La generación de cargas electrostáticas por frotamiento**, se explicará este proceso en la Figura 2.9

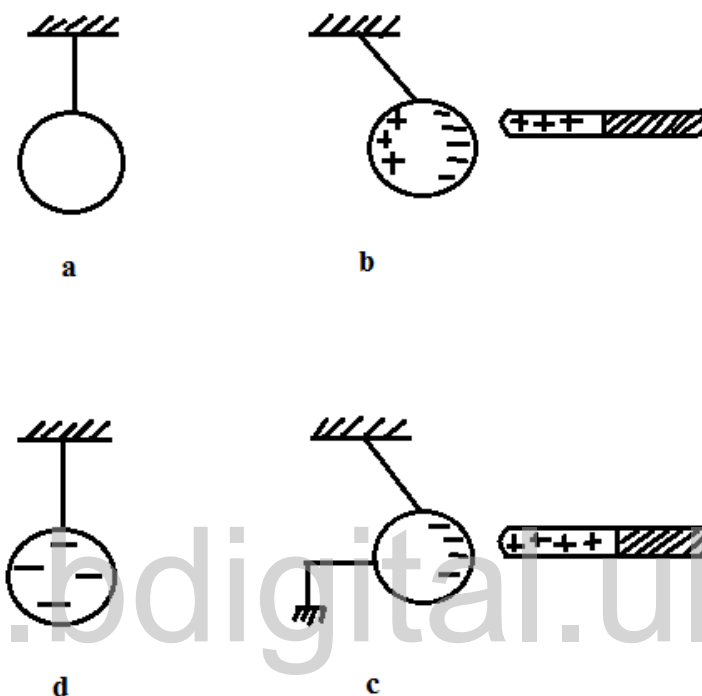


**Figura 2.9 electrificación por fricción [7]**

En la naturaleza hay materiales que tienden a ceder o ganar electrones como se verá más adelante en la explicación de la serie triboeléctrica. En esta Figura 2.9 se tiene una varilla de vidrio y la piel de gato, cuando se frota una varilla de vidrio (tiende a ceder electrones), con una piel de gato (tiende a ganar electrones), entre la piel y el aislador frotado, se transfieren electrones desde la varilla de vidrio a la piel de gato, debido a esto la varilla queda con déficit

de electrones y la piel de gato con exceso de electrones. Luego al separarse los dos materiales también se separan las cargas y se crea un campo eléctrico [7].

**2.4.3 La generación de cargas electrostáticas por inducción**, se explicará este proceso en la Figura 2.10



**Figura 2.10 electrificación por inducción [7]**

se considera ahora una esfera conductora neutra colgada de un hilo aislante, tal como se muestra la Figura 2.10a si se le acerca una varilla con déficit de electrones “cargada positivamente”, se verá que la esfera tiende a acercarse a la varilla, como se observa en la Figura 2.10b. Esto se debe a que los electrones libres de la esfera son atraídos por el campo eléctrico creado por la varilla y se manifiesta con una fuerza de atracción que desplaza la esfera hacia la derecha. Pero al haberse movilizado internamente en ella los electrones hacia la derecha queda esa zona cargada negativamente mientras que la zona opuesta, o sea, la de la izquierda, desde donde se han desplazado los electrones, ha quedado con carga positiva. La carga de ambas zonas, es en valor absoluto la misma, de modo que si se retira después la varilla inductora, la esfera seguirá estando neutra y en equilibrio, como en la Figura 2.10a pero si antes de acercar la varilla se tenía la esfera conectada a tierra como se muestra en la Figura

2.10c, se debe comprender que por inducción, ahora en la esfera solo aparecerán cargas negativas, pues en este caso, la esfera, el hilo conductor y la tierra se puede considerar como un conductor único, por lo que se debe suponer que habrá un flujo de electrones que se movilizaran desde tierra debido al campo creado por la varilla y equilibraran las cargas positivas del lado izquierdo de la esfera. También en la Figura 2.10c, si se retira de nuevo la varilla inductora la esfera volverá a quedar neutra, pues sus electrones en exceso pasaran otra vez a tierra. Pero si previamente se desconecta la esfera de tierra, ella quedara cargada negativamente y al retirar la varilla inductora, por simetría las cargas se repartirán uniformemente por la superficie de la esfera, como lo muestra la Figura 2.10d. [7]. Para inducir, el cuerpo inductor puede tener una forma cualquiera y puede ser lo mismo un conductor que un aislador cargado [7].

Ya explicado cómo se generan cargas electrostáticas, que será la base física del efecto triboeléctrico, se explica a continuación dicho efecto.

## **2.5 EFECTO TRIBOELÉCTRICO**

Se denomina triboelectricidad (del griego *tribein* “frotar” y *electrón*, “ámbar”) a un tipo de electrificación causado por el contacto de un material con otro de distinta naturaleza. La polaridad y la magnitud de las cargas producidas se diferencian según los materiales, la aspereza superficial, la temperatura, la tensión y otras características.

Cuando se frotran dos materiales compuestos por elementos diferentes, la diferencia en afinidad electrónica provoca que uno de los materiales adquiera electrones del otro, provocando que uno quede “cargado positivamente” y otro de manera negativa, es decir uno quede con déficit de electrones y otro con exceso. Para que se produzca esta transferencia de electrones no es necesario el frotamiento, mediante contacto también se produce esta transferencia, pero al frotar se renuevan continuamente los puntos de contacto por donde se transfieren los electrones, y por lo tanto tiene el mismo efecto que si aumentáramos la superficie real de contacto [8].

Una vez que el intercambio de electrones ha tenido lugar y los dos cuerpos se han separado, si el material es conductor las cargas se repartirán uniformemente por toda la superficie, mientras que si el material es aislante, la carga permanecerá en los puntos de la superficie donde ha

tenido lugar la transferencia de cargas. En este último caso, el valor de la carga depositada puede oscilar entre  $10^{-11}$  y  $10^{-9}$  C por cada milímetro cuadrado de superficie (aproximadamente un electrón libre por cada 1000 átomos) [8].

Lo anterior no aclara la relación de la magnitud de las cargas separadas con los materiales a entrar en contacto, sin embargo, desde hace muchos años existen estudios sobre esta relación y que se reflejan en un listado denominadas serie triboeléctrica.

## 2.6 SERIE TRIBOELÉCTRICA

La magnitud de la carga electrostática está relacionada con la posición o distancia relativa entre sí de los materiales en la serie, y su signo está determinado por la propensión de un material a ceder o ganar electrones, que es lo que en realidad indica tal serie.

**Tabla 0.2 Materiales de la serie triboeléctrica [9].**

1. Aire	24. Globo de goma
2. Piel humana	25. Resinas
3. Cuero	26. Goma dura
4. Piel de conejo	27. Níquel, cobre
5. Vidrio	28. Azufre
6. Cuarzo	29. Bronce, plata
7. Mica	30. Oro, platino
8. Pelo humano	31. Acetato, Rayón
9. Nylon	32. Goma sintética
10. Lana	33. Poliéster
11. Plomo	34. Espuma de poliestireno
12. Piel de gato	35. Orlón
13. Seda	36. Papel film para embalar
14. Aluminio	37. Poliuretano
15. Papel (pequeña carga positiva)	38. Polietileno (cinta scotch)
16. Algodón (sin carga)	39. Polipropileno
17. Acero (sin carga)	40. Kapton
18. Madera (pequeña carga negativa)	41. Vinilo (PVC)
19. PolimetilmetacrilatoPMMA	42. Silicio
20. Ámbar	43. Teflón
21. Lacre	44. Goma de silicona
22. Acrílico	45. Ebonita
23. Poliestireno	46. politrifluorocloroetileno

Consecuentemente con esto, frotando dos materiales de la secuencia, el que está en la posición más alta cederá electrones, mientras que el que se situó más abajo ganará electrones. Además, cuanto más separados estén los materiales en la tabla, más intensa es su electrización [9]. Dicho de otro modo, mientras más lejos están los dos materiales en la serie, mayor es la carga transferida. Esta tabla, aunque orientativa, no siempre son estrictas, puesto que dependen del estado de las superficies que se ponen en contacto, de la humedad, del frotamiento y de otros factores [9].

Es de notar, que el fenómeno triboeléctrico explicado anteriormente, es solo un aspecto de un panorama más general de obtener carga eléctrica. Con el fin de darle un uso práctico del efecto triboeléctrico. A continuación se tratará las diferentes opciones de recolección de energía.

## **2.7 COLECTORES DE ENERGÍA**

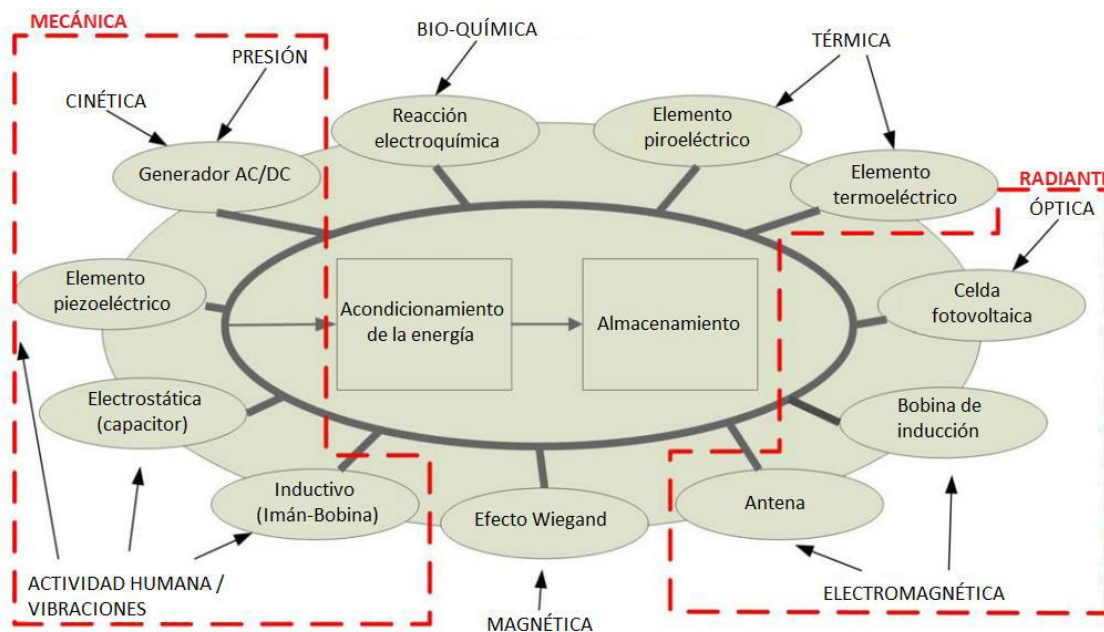
Son los sistemas encargados de la recuperación, la reutilización y el aprovechamiento de los diferentes tipos de energía que se encuentran en el ambiente que usualmente se desperdician son llamados colectores de energía, estos sistemas realizan el proceso de transformación de la energía solar, la térmica, la eólica, el ruido, las vibraciones, entre otras, en energía eléctrica [10]

### **2.7.1 Clasificación de los colectores de energía**

El entorno de cada persona se pueden encontrar diversas formas de energía interactuando, estos diferentes tipos de energía pueden ser fuentes de potencia que por lo general son inutilizadas. La clasificación de los colectores se muestra a continuación en la figura 2.11

De acuerdo al tipo de energía que usan para su funcionamiento y relaciona cada uno con su respectivo transductor, tal como se puede observar esta clasificación presenta cinco grupos principalmente: los mecánicos, los magnéticos, los radiantes, los térmicos y los bioquímicos [11].

Dentro de los mecánicos se encuentran los que usan la presión, la cinética, las vibraciones y las diversas actividades humanas como fuente principal de obtención de energía, los cuales son:



**Figura 0.11. Diferentes fuentes de energía y sus respectivos transductores para su conversión a energía eléctrica [11].**

**Generadores DC/AC**, es un dispositivo que aprovecha las vibraciones de la naturaleza y el movimiento humano, para transformarla en energía eléctrica en base al principio electromagnético de la ley de Faraday [11].

**Elemento piezoeléctrico**, es un generador que funciona bajo el principio del fenómeno físico llamado efecto piezoeléctrico el cual ocurre en algunos cristales debido al cual, aparece una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre ciertas caras del cristal cuando este se somete a una deformación mecánica [12].

**Los electrostáticos**, utilizando la actividad humana como fuente primaria, este tipo de generador produce carga estática, para luego almacenar esa energía en un capacitor y posteriormente ser utilizada [11].

**Los magnéticos**, por su parte aprovechan el efecto *Wiegand*, el cual consiste en la conmutación de la magnetización de la zona central de un hilo ferro-magnético cuando éste es sometido a un campo magnético externo intenso [11].

**Los radiantes**, como su mismo nombre lo indica aprovechan la radiación electromagnética en sus formas de radio frecuencia y de luz tales como:

**Celdas fotovoltaicas**, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotoeléctrico es el fenómeno en el que las partículas de luz llamadas fotón, impactan con los electrones de un metal arrancando sus átomos. El electrón se mueve durante el proceso, dando origen a una corriente eléctrica [13].

**Las antenas o bobinas**, la energía es transferida a través de cortas distancias por campos magnéticos usando un acoplamiento magnético entre electrones [11].

Los térmicos usan **elementos piroeléctrico**, es la propiedad que presentan ciertos materiales que sometidos a cambios de temperatura experimentan cambios en la polarización eléctrica, por lo que dichos cambios de temperatura inducen un campo eléctrico en el interior del material, causado por movimiento de cargas positivas y negativas en los extremos opuestos de la superficie [14].

Y el **elemento termoeléctrico**: es la conversión de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico y viceversa. Un dispositivo termoeléctrico cae un voltaje cuando hay una diferencia de temperatura a cada lado [15].

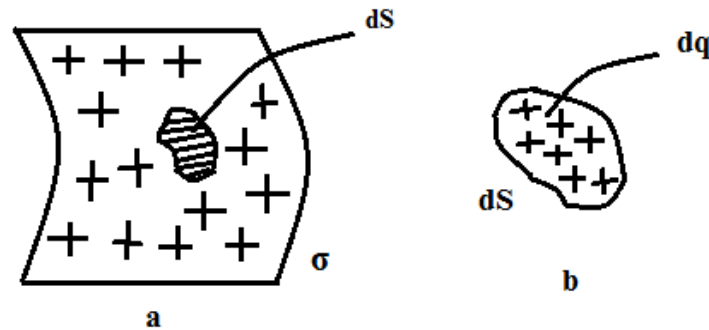
Por último, **los bioquímicos**: un ejemplo de ellos sería una planta, que puede ser un tubérculo porque genera una abundante cantidad de nutrientes, se coloca en una caja de madera dotada de una rejilla de electrodos. En la tierra se encuentran unas geobacterias, unas bacterias anaeróbicas que se alimentan de los nutrientes que la planta libera de sus raíces, y cuando realizan este proceso, generan electrones que son capturados por los electrodos colocados a tierra [16].

Si bien el efecto triboeléctrico se conoce desde hace miles de años, un conocimiento profundo en relación a él es bastante limitado. Por lo cual los investigadores han llevado a cabo estudios para cuantificar este efecto triboeléctrico utilizando instrumentos como se verá a continuación.

## 2.8 CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO TRIBOELÉCTRICO

Un concepto útil para entender la cuantificación del efecto triboeléctrico, es el de la densidad de carga superficial ( $\sigma$ ).

**Densidad superficial de carga superficial**, este parámetro es muy importante en el estudio minucioso del proceso de carga por efecto triboeléctrico y se definirá como el nivel de concentración de carga eléctrica distribuida sobre una superficie [17]. El cual se observa en la Figura 2.12a



**Figura 2.12 Diferencial de superficie (a) de carga (b) [17].**

Para la estimación de la densidad de carga superficial, se considera un diferencial de superficie que puede estar expresada en un sistema de coordenadas adecuado como cartesiano, cilíndrico o esférico dependiendo de la forma del material. Este elemento superficial ( $dS$ ), establece una carga elemental infinitesimal ( $dq$ ) como se muestra en la Figura 2.10b que permitirá cuantificar una densidad superficial de carga ( $\sigma$ ), expresada matemáticamente como [17]:

$$\sigma = \frac{dq}{dS} \quad (0.5)$$

Cuya dimensiones en el SI es de  $C/m^2$ .

El conocer esta variable permitirá determinar la carga total que se distribuye en la superficie, empleando de la ecuación 2.4 tal como se muestra

$$q = \iint_S \sigma dS \quad (0.6)$$

Cuyas dimensiones en el SI es de C.

Conocida la densidad de carga superficial, se procede a mencionar los instrumentos utilizados para la cuantificación del efecto triboeléctrico, los investigadores recurrieron a instrumentos tales como colectores de carga inducida. Esta carga inducida se produce al rodar esferas sobre la parte superior de un disco dieléctrico.

Además de esto también usaron el microscopio de fuerza atómica (de sus siglas en inglés, *atomic force microscopy*, AFM) para medir la fuerza electrostática de la superficie o el potencial en las superficies de contacto en micro-muestras de un material [18].

Los dispositivos electrónicos de tamaño pequeño funcionan con un consumo de energía ultra bajo, lo que hace posible que sea alimentado por la energía obtenida de nuestro entorno de vida. No sería práctico si las redes de sensores tuvieran que ser alimentadas completamente con baterías, debido a la gran cantidad de dispositivos, el gran alcance de la distribución y la dificultad de rastrear y reciclar para minimizar el impacto ambiental y posiblemente la salud.

Por lo tanto, son necesarias fuentes de energía que satisfagan las operaciones independientes y continuas de tales dispositivos electrónicos pequeños [10].

Las nuevas tecnologías que pueden extraer energía del medio ambiente como fuentes de micro / nano energía autosuficientes y sustentables son un campo emergente de la nanoenergía, que trata sobre las aplicaciones de los nanomateriales y la nanotecnología para el aprovechamiento de la energía para alimentar a los micro / nanos sistemas [10].

A continuación, se profundizará la explicación de los nanogeneradores.

## **2.9 NANOGENERADORES**

Son los encargados de utilizar movimientos mecánicos de un cuerpo y con ello cumplir otra tarea para la cual fueron destinados, el tamaño de ellos es exageradamente pequeños y es por ellos que los mismos se miden en nanómetros. Están conformados por nanocables, que son aún más pequeños, pudiéndolos comparar con el cabello humano, de hecho pueden agruparse varios nanocables en el espacio que ocupa un solo cabello.

Asimismo, de no estar conformados por nanocables, su estructura se basa en materiales piezoeléctricos, en ambos casos, al ser estos muy flexibles y doblarse o estirarse producen energía eléctrica, por lo que, suelen utilizarse como medio para poder adquirir energía de alguna fuente, ya sea natural o artificial. Es por ello una de las razones por las que se estén usando tecnología de nanogeneradores para muchas situaciones. Existen diversos tipos de nanogeneradores [19]:

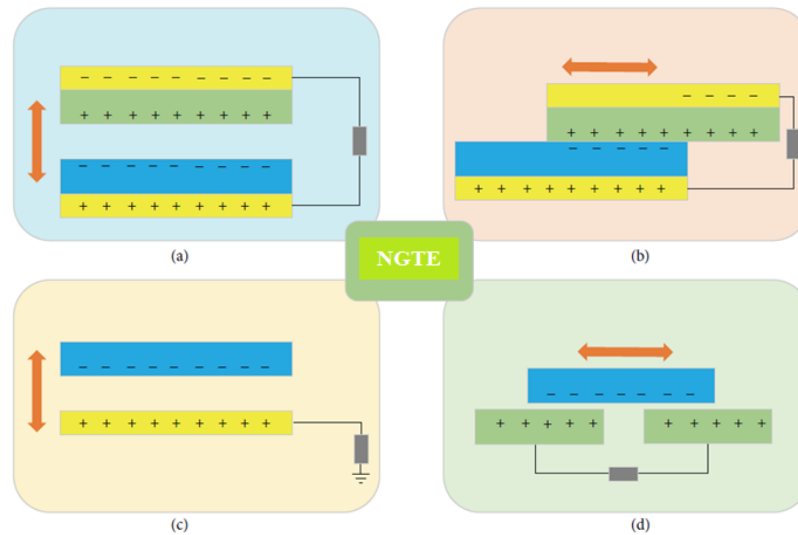
**Los nanogeneradores piezoeléctricos:** estos nanogeneradores que utilizan estructuras nanométricas construidas con materiales con propiedades piezoeléctricas, se puede obtener electricidad cuándo son apretados o presionados. La energía mecánica necesaria para generar electricidad puede proceder del movimiento originado por la circulación sanguínea y por órganos como el corazón [20].

**Los nanogeneradores híbridos:** se puede combinar un nanogenerador con una célula solar para así crear un dispositivo de recolección de energía solar y mecánica. Podría utilizarse, por ejemplo, para proveer de energía a los sensores de los aviones, gracias a la captura de la luz solar y las vibraciones del motor [21].

**Los nanogeneradores triboeléctricos :** funcionan mediante una combinación del efecto triboeléctrico (electrificación generada por contacto o fricción con otro material) y la inducción electrostática [22]. Estos tipos de nanogeneradores se estudiarán detalladamente a continuación.

## **2.10 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LAS MODALIDADES PARA NANOGENERADORES TRIBOELÉCTRICOS**

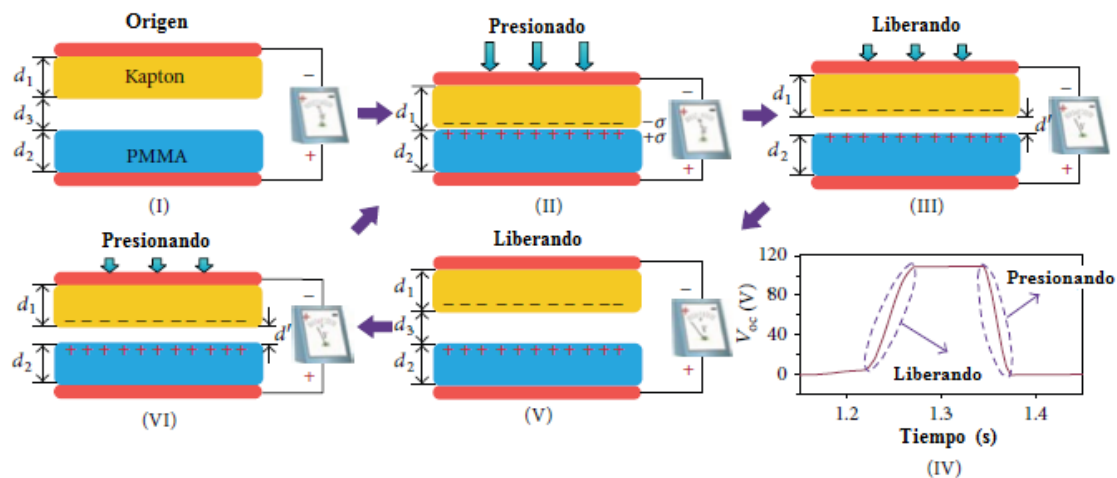
Los nanogeneradores triboeléctricos (de sus siglas en español, NGTE), son aquellos donde se realizan la conversión de energía mecánica en energía eléctrica utilizable a través de la conjunción de triboelectrificación con inducción electrostática. Existen cuatro modos fundamentales del NGTE, que incluyen, el modo de separación por contacto vertical, modo deslizante en el plano, modo de electrodo único y el modo de capa triboeléctrica independiente, los cuales se observa en la Figura 2.13 [23].



**Figura 0.13.** Los cuatro modos fundamentales de NGTE, a) El modo de separación por contacto vertical, b) El modo deslizante en el plano, c) El modo solo electrodo y d) El modo de capa triboeléctrica independiente [23].

### 2.10.1 Modo de separación de contacto vertical

El principio de funcionamiento de los NGTE con modo de separación de contacto vertical se puede describir mediante la combinación de la electrificación de contacto y la inducción electrostática [24] tal como se muestra en la figura 2.14.



**Figura 0.14.** Proceso de generación de electricidad en un ciclo completo de NGTE para el modo de separación de contacto vertical a circuito abierto [24].

Para explicar este principio básico se emplea como ejemplo dos materiales dieléctricos, distantes en la serie triboelectrica uno de ellos es el metacrilato de polimetilo (de sus siglas en inglés, *polymethyl methacrylate*, PMMA) con un espesor  $d_2$ , adherido a un material conductor denominado electrodo y el otro dieléctrico, es el Kapton con espesor  $d_1$  también adherido a un material conductor que funciona como electrodo, esos dos electrodos se conectan a un electrómetro para medir su voltaje de salida a circuito abierto (Voc). En el estado original tal como se muestra en la Figura 2.14-I se aprecia una separación entre los dos polímeros  $d_3$ , los cuales aun no han entrado en contacto, consecuentemente no se genera ni se induce ninguna carga por efecto triboeléctrico y no existe una diferencia de potencial eléctrico d.d.p entre los dos electrodos.

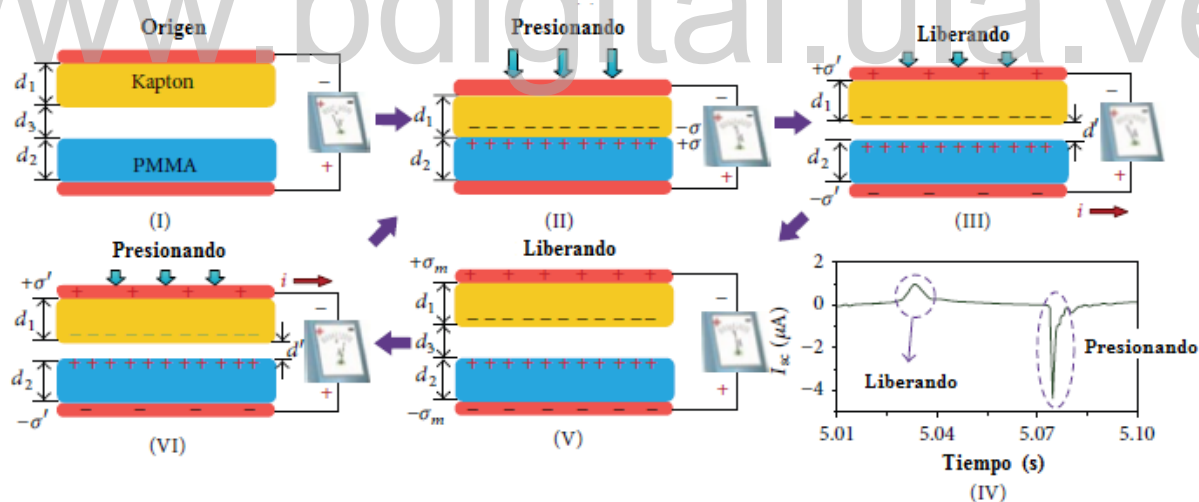
A continuación, un desplazamiento provocado externamente (presionando) ocasiona que  $d_3$  disminuya a cero como se muestra en la Figura 2.14-II , haciendo que los dos polímeros se pongan en contacto entre sí, luego la transferencia de carga superficial se realiza en el área de contacto debido al efecto triboeléctrico, los electrones se transfieren desde el PMMA hacia el Kapton, lo cual genera cargas netas negativas en la superficie del Kapton con una densidad de carga superficial  $-\sigma$  y cargas netas positivas en la superficie del PMMA con una densidad de carga superficial  $+\sigma$ , respectivamente. Vale la pena señalar que la propiedad aislante de los polímeros permite una retención prolongada de las cargas triboeléctricas durante horas o incluso días [24] y como solo están confinadas en la superficie, las cargas con signos opuestos coinciden en casi el mismo plano.

Cuando el generador comienza a liberarse, la película de Kapton tiende a volver a su posición original debido al efecto de atracción por la distribución de las cargas. A medida que los dos polímeros se van separando, tal como muestra la Figura 2.14-III aparece una separación  $d'$  y se va estableciendo una d.d.p. entre los dos electrodos en condición de circuito abierto, ya que ahora existe una separación de las cargas triboeléctricas opuestas. Conforme se produce la liberación del generador, el voltaje a circuito abierto Voc sigue aumentando con el incremento de  $d'$ , hasta alcanzar el valor máximo  $d_3$  como se muestra en la Figura 2.14-V. Cuando la película de Kapton se mantiene en esa posición máxima el valor alcanzado permanecerá constante, siempre que la impedancia de entrada del electrómetro sea infinitamente grande, tal como se puede observar en la Figura 2.14-IV.

Si luego se inicia el acercamiento de los dos polímeros (presionando), la d.d.p entre las dos capas comienza a disminuir junto con  $d'$ , como muestra la Figura 2.14-VI, dando como resultado una disminución del  $V_{oc}$ , el cual cae del valor máximo hasta cero, justo cuando vuelven a hacer contacto completo los dos polímeros  $d' = 0$ , como se muestra en la Figura 2.14-II.

La Figura 2.14-IV es una representación gráfica de todo el proceso explicado anteriormente, donde se considera la variación del  $V_{oc}$  vs tiempo y en la cual, en primer lugar se puede observar el comportamiento unidireccional de la señal del voltaje. En el proceso de liberación se observa una pendiente positiva de la curva acorde con el incremento del voltaje hasta llegar a un máximo que permanecerá constante mientras se mantenga invariable la separación. Luego en el proceso de presionado se manifiesta una pendiente negativa que corresponde a la disminución progresiva del voltaje hasta llegar a cero en el momento en el que entra en contacto los dos polímeros [24].

Para el proceso de cortocircuito como se muestra en la Figura 2.15



**Figura 0.15. Proceso de generación de electricidad en un ciclo completo de NGTE para el modo de separación de contacto vertical a cortocircuito [24].**

En primer lugar se cortocircuitan los electrodos y se conecta al electrómetro para medir la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) Figura 2.15-I, luego los dos polímeros entran en contacto entre sí, tal como muestra la Figura 2.15-II produciéndose el efecto triboeléctrico, el Kapton queda cargado negativamente con densidad de carga superficial  $-\sigma$  y el PMMA cargado

positivamente con densidad de carga superficial  $+\sigma$ . A continuación comienza el proceso de separación de los electrodos Figura 2.15-III, por inducción electrostática los electrodos se polarizan, estableciéndose “carga positiva” en el electrodo superior de densidad de carga superficial  $+\sigma'$  y “carga negativa” en el electrodo inferior de densidad de carga superficial  $-\sigma'$ , esta densidad disminuye a medida que se van separando los polímeros por la transferencia de las cargas y se crea un campo eléctrico, debido al cual los electrones irán en sentido contrario a este campo, es decir desde el electrodo inferior al superior [24].

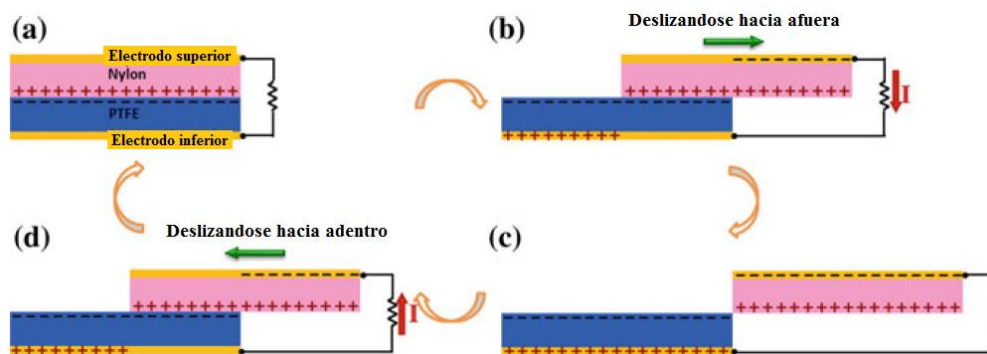
Cuando alcanza una separación máxima, tal como muestra la Figura 2.15-V alcanza una mínima densidad de carga superficial  $+\sigma_m$  para el electrodo superior y  $-\sigma_m$  para el electrodo inferior, debido al cese de la transferencia de electrones ( $I_{sc} = 0$ ).

Luego, cuando comienza el proceso de acercamiento de los polímeros Figura 2.15-VI el electrodo inferior debido a la pérdida de electrones queda cargado positivamente, por lo tanto, está a un mayor potencial que el electrodo superior, debido a esto cambia la dirección del campo y consecuentemente ahora hay un flujo de electrones desde el electrodo superior al electrodo inferior, de esta manera se equilibra el sistema cuando llega a su posición original Figura 2.15-II [24].

La Figura 2.15-IV es una representación gráfica de todo el proceso explicado anteriormente, donde se refleja el comportamiento de la  $I_{sc}$  vs tiempo, en primer lugar se puede observar el comportamiento alterno de la señal de corriente. En el proceso de liberación se muestra un pico positivo, decayendo a cero cuando se alcanza la separación máxima de los polímeros. Luego en el proceso de presionado se observa un pulso negativo que corresponde al retorno de los electrones desde el electrodo superior al inferior, hasta cesar el flujo en el momento en el que hacen contacto nuevamente los dos polímeros [24].

### 2.10.2 Modo deslizante lateral

La estructura básica para el NGTE de modo deslizante es muy similar al modo de separación por contacto, la única diferencia es la dirección de separación de las cargas. Por lo tanto, su proceso de inducción electrostática también es similar al modo contacto separación, por lo que llamaron a ambos modos de electrodo adjunto, como se representa esquemáticamente en la Figura 2.16 [25].



**Figura 2.16. NGTE basado en la separación de cargas en el plano. Los bocetos ilustran el proceso de generación de electricidad en un ciclo completo del movimiento de deslizamiento en condiciones de casi corto circuito [25]**

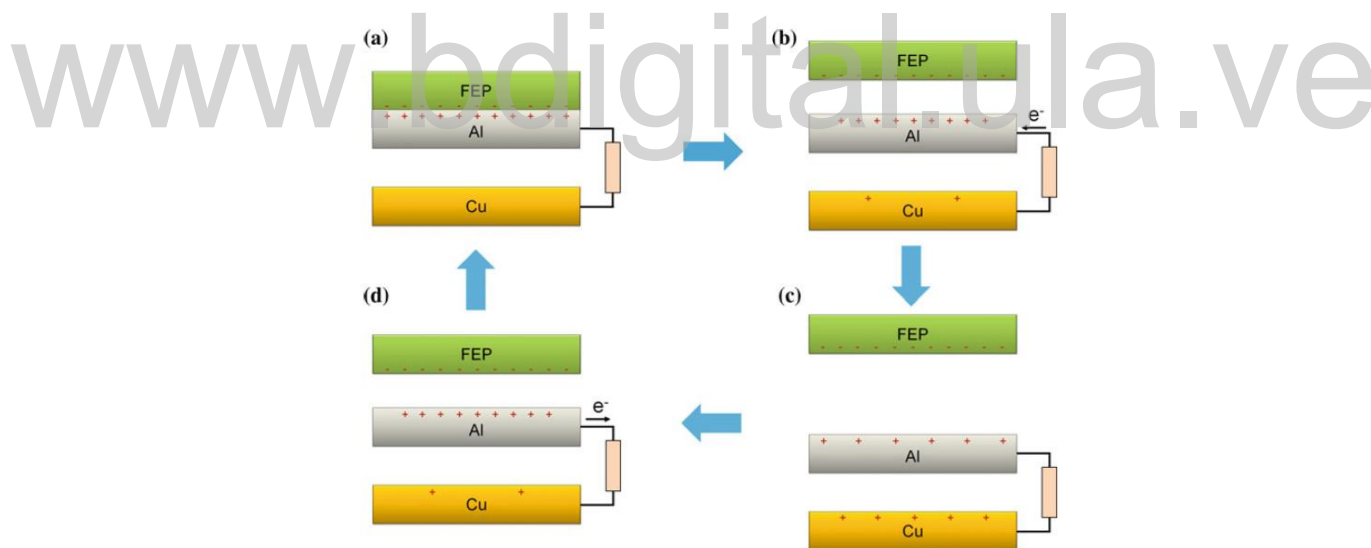
Aquí, un par de materiales poliméricos, como el nylon y el Politetrafluoruretano (de sus siglas en inglés, *Polytetrafluoroethylene*, PTFE), se toman como ejemplo para ilustrar el principio de funcionamiento general el cual se puede aplicar a cualquier otro material. En la posición original Figura 2.16a, las dos superficies poliméricas se superponen completamente y entran en contacto entre sí, debido al efecto triboeléctrico la superficie de nylon adquirirá cargas netas positivas y el PTFE cargas netas negativas [26]. Una vez que la placa superior con la superficie cargada positivamente comienza a deslizarse hacia afuera Figura 2.16b, se inicia la separación de cargas en el plano, debido a la disminución en el área de la superficie de contacto, esto ocasiona un aumento de las cargas separadas lo que generará un campo eléctrico que apunta de derecha a izquierda casi paralelo a las placas, lo que induce un mayor potencial en el electrodo inferior, por lo que conducirá un flujo de electrones desde el electrodo superior al electrodo inferior, continuando a lo largo del proceso de deslizamiento, incrementándose las cargas separadas, hasta que la placa superior se deslice completamente fuera de la placa inferior y las superficies tribo-cargadas estén completamente separadas Figura 2.16c [26].

Posteriormente, cuando la placa superior inicia su movimiento de regreso Figura 2.16d, las cargas separadas comienzan a entrar en contacto. Las cargas transferidas en los electrodos regresarán desde el electrodo inferior al electrodo superior a través de la carga externa con el aumento del área de contacto, para mantener el equilibrio electrostático. Una vez las dos placas entren en la posición de solapamiento, las superficies cargadas entran de nuevo en contacto completo y no quedarán cargas transferidas en el electrodo y el dispositivo regresará al estado que se muestra en la Figura 2.16a [26].

### 2.10.3 Modo de un solo electrodo, Nanogenerador triboeléctrico de un solo electrodo o simple electrodo (de sus siglas en español, NGTESE)

El principio de funcionamiento de los NGTESE puede ser descrito como una combinación entre electrificación por contacto (triboelectrificación) e inducción electrostática como se muestra en la Figura 2.17

Representa, para efectos de explicación, un NGTESE modo de contacto separación, conductor a dieléctrico. En el estado original, las capas de aluminio (electrodo primario) y etileno propileno fluorado (de sus siglas en inglés, *fluorinated ethylene propylene*, FEP) se colocan en contacto entre sí, la transferencia de la carga superficial se realiza en la zona de contacto por efecto triboeléctrico, los electrones se transfieren desde el aluminio al FEP, lo que resulta en cargas netas negativas en la superficie del FEP y cargas positivas en la superficie de aluminio. Dado que solo están confinadas en la superficie, las cargas con signos opuestos coinciden casi en el mismo plano 2.17a.



**Figura 2.17. Mecanismo de trabajo del NGTESE conductor a dieléctrico de electrodo único basado en separación de contacto vertical. Los bocetos ilustran el proceso de generación de electricidad en un ciclo completo, del movimiento de contacto en condiciones de cuasi cortocircuito [27]**

Una vez que la capa de FEP se separa de la capa de aluminio, una diferencia de potencial se establece entre el aluminio y la lámina de cobre (electrodo secundario o de referencia), bajo condición de circuito abierto y con la capa de FEP separándose, el voltaje a circuito abierto

$V_{OC}$  sigue aumentando hasta alcanzar el valor máximo en el instante en que la capa FEP llega a la posición máxima de separación [27].

Si los dos electrodos están en cortocircuito, cualquier diferencia de potencial puede establecerse entre los dos electrodos separados, es decir, se crea un campo desde el electrodo primario hacia el electrodo de referencia, por ello la transferencia de electrones va en dirección contraria del campo como se muestra en Figura 2.17b, lo que resulta en una corriente instantánea. Cuando la capa FEP está lo suficientemente lejos, los autores de esta investigación Zhong Lin Wang y otros [27], concluyeron que se transfiere aproximadamente la mitad de la carga negativa del electrodo de referencia al electrodo primario, lo que hace que el electrodo superior disminuya su potencial con respecto al electrodo inferior Figura 2.17c. Una vez que la capa de FEP es conducida para entrar en contacto nuevamente con el electrodo de aluminio, se revierte el proceso para su equilibrio, y ahora ya que el electrodo inferior está a un mayor potencial, consecuentemente cambia la dirección del campo eléctrico, en consecuencia los electrones se transfieren desde el electrodo superior al electrodo inferior Figura 2.17d [28].

Finalmente, tanto el NGTE y el NGTESE, sus electrodos se deben conectar a un puente rectificador para obtener corriente continua y luego se debe almacenar dicha corriente en un capacitor, para su uso posterior.

Una vez explicado el funcionamiento de las modalidades para los NGTE y el NGTESE, queda claro que son muy similares en su funcionamiento básico pero también poseen algunas diferencias como se verá a continuación.

## **2.11 COMPARACIÓN ENTRE EL NGTE Y EL NGTESE**

Dadas muchas similitudes entre NGTESE y NGTE de electrodo adjunto, estos dispositivos tienen algunas diferencias tanto estructurales como eléctricas, tal como se muestra en la Figura 2.18. Entre todas estas diferencias, las influencias de la distancia de separación de los electrodos y las dimensiones del área, en el rendimiento de salida son los más importantes.

En primer lugar se observa que la distancia de separación para el NGTE Figura 2.18a es variable  $x(t)$  y en el NGTESE Figura 2.18b es constante ( $g$ ), debido a la inmovilidad de los

electrodos del NGTESE, su capacidad interna es casi una constante ( $C_0$ ) con el aumento de  $x$ , sin embargo, para la estructura del NGTE, su capacidad disminuye rápidamente cuando la distancia entre los dos electrodos está aumentando.

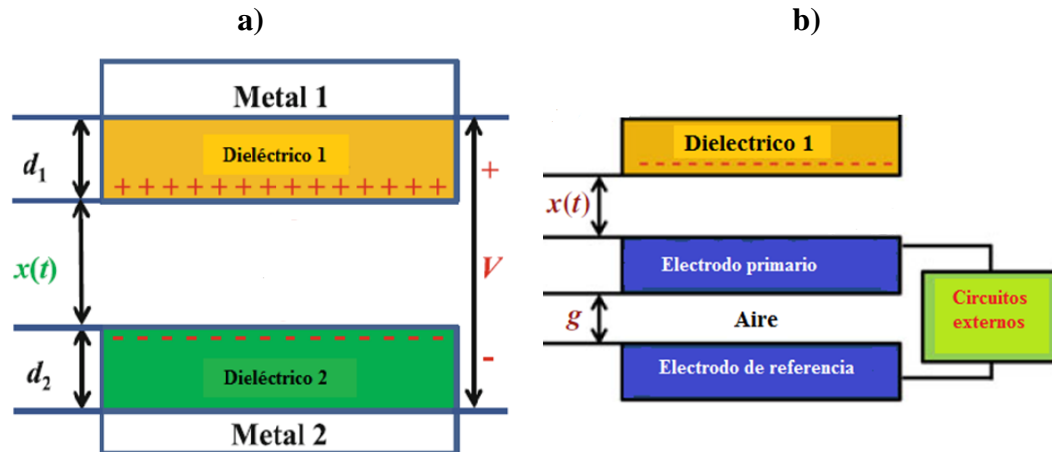


Figura 2.18 Comparación de NGTE y NGTESE [29].

En segundo lugar, en el NGTESE, el voltaje a circuito abierto  $V_{OC}$  se satura rápidamente a un valor mucho más bajo que el de la estructura NGTE, esto se debe a que cuando el dieléctrico está muy lejos de los electrodos, su influencia en la distribución del campo eléctrico alrededor de los electrodos es pequeña, por lo tanto, un mayor aumento en  $x$  contribuirá poco al aumento de  $V_{OC}$ . Finalmente, en el NGTESE, las cargas transferidas a corto circuito  $Q_{SC}$  alcanzan lentamente su valor máximo, que es solo la mitad del valor para el NGTE del electrodo adjunto. El rendimiento de transferencia de carga en cortocircuito maximizado solo puede alcanzar el 50%, mientras que el NGTE de electrodo adjunto puede alcanzar casi el 100% incluso cuando  $x$  es relativamente pequeña. [29]

En relación a la distancia entre los electrodos ( $g$ ), el  $V_{OC}$  sube monótonamente con el aumento de  $g$  mientras  $Q_{SC}$  disminuye. Los estudios realizados de este dispositivo determinan una  $g$  óptima sobre los 1,54 cm y una longitud  $L$  óptimo de 4,7 cm para generar la potencia máxima transmitida [29].

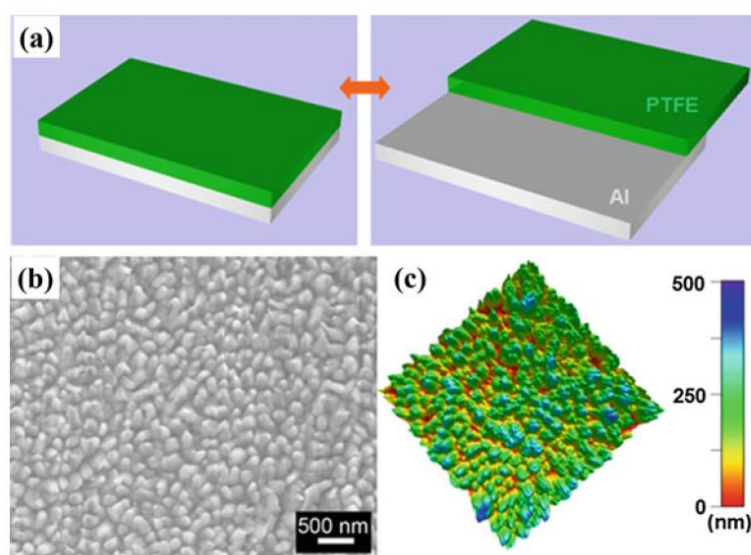
A demás de comprender el funcionamiento de las modalidades de NGTE y NGTESE y las diferencias que existe entre ellos, una manera de mejorar el rendimiento de estos

nanogeneradores, consiste en utilizar materiales con superficies procesadas con nanotecnología incrustando estructuras de nanopartículas como lo describe a continuación.

## 2.12. CASO ESPECIAL DE NANOGENERADOR

La Figura 2.19a ilustra un diagrama esquemático de un NGTE de estructura lateral deslizante, que consiste en un parche de PTFE triboeléctrico y una placa de Al, donde el Al desempeña funciones duales de una superficie triboeléctrica y un electrodo [30].

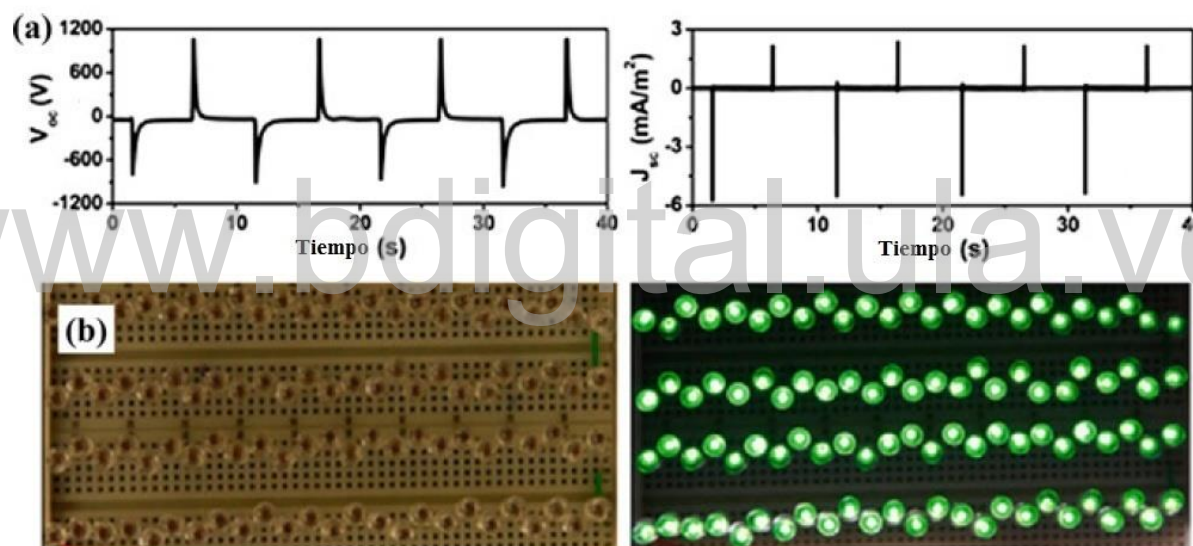
Por lo general, el rendimiento de salida del NGTE puede mejorarse aumentando la rugosidad de la superficie y el área de superficie efectiva de los materiales triboeléctricos para inducir una mayor densidad de carga triboeléctrica. Para aumentar la densidad de carga triboeléctrica en la superficie del PTFE, se puede crear grabando en seco usando plasma acoplado inductivamente (de sus siglas en inglés, *Inductively Coupled Plasma*, ICP) unas estructuras de nano-partículas. La Figura 2.19b muestra la imagen de un SEM de la superficie de PTFE grabada, que se cubre uniformemente con estructuras de nano-partículas con un diámetro promedio de aproximadamente 200 nm. La superficie grabada de PTFE se caracterizó además por el microscopio de fuerza atómica (AFM), que muestra las mismas estructuras de nano-partículas en la superficie, como se ilustra en la Figura 2.19c.



**Figura 0.19. a) diagrama esquemático del NGTE modo de electrodo único de deslizamiento lateral. b) imagen SEM de la superficie de PTFE con estructura de nano-partículas grabadas. c) Imagen grabada de AFM de la superficie de PTFE [30]**

La Figura 2.20a muestra el rendimiento de salida del NGTE basado en un solo electrodo, donde el voltaje a circuito abierto  $V_{OC}$  puede alcanzar los 1100 V con un pico  $J_{SC}$  de 6 mA /  $m^2$ . Para confirmar que las señales de salida obtenidas en la Figura 2.20b fueron generadas por el NGTE

la energía producida lo usaron para iluminar directamente cien LED verdes con un movimiento de deslizamiento rápido del PTFE en la placa de Al, como se muestra en la Figura 2.20b. Con el fin de demostrar claramente la salida de AC, estos LED se dividieron en dos grupos en serie, que estaban conectados al NGTE. Bajo una baja frecuencia de deslizamiento, los dos grupos de LED se encendieron alternativamente. La vida útil del NGTE fabricado puede aumentar a varias decenas de años aumentando el espesor de la película de PTFE [30].



**Figura 0.20. Rendimiento de la salida eléctrica del NGTE deslizante basado en un solo electrodo. a) Voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) y la densidad de corriente de cortocircuito ( $J_{SC}$ ) del NGTE b) 100 LED verdes comerciales controlados directamente por el NGTE bajo un movimiento deslizante [30]**

Hasta aquí todo lo estudiado anteriormente se centra en las distintas modalidades de generar cargas eléctricas y mejorar su rendimiento, pero para que esta energía sea utilizada para casos prácticos, se requiere de un elemento que almacene estas cargas producidas. Estos elementos almacenadores son los capacitores y los denominados ultracapacitores.

## 2.13 CAPACITANCIA.

Si se consideran dos conductores separados por un material dieléctrico de constante de permeabilidad  $\epsilon$  y los llamamos conductor 1 (C1) y conductor 2 (C2), además C1 posee una carga positiva  $Q$  y C2 posee una carga del mismo valor absoluto pero negativa  $-Q$ . Se sabe que la carga llega a la superficie como una densidad de carga superficial, que el campo eléctrico es normal a la superficie del conductor y además cada conductor es una superficie equipotencial. [31]

Si C1 contiene la carga positiva, el flujo eléctrico se dirige de C1 a C2, y C1 tiene el potencial más positivo, es decir que debe realizarse trabajo para llevar una carga positiva de C2 a C1. [31]

Designando la diferencia de potencial entre C1 y C2 como  $\Delta V$ , se define la capacitancia de este sistema de conductores como “la relación de la magnitud de la carga en cualquiera de los conductores a la magnitud de la diferencia de potencial entre dichos conductores”. [32]

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (2.7)$$

La capacitancia siempre será una cantidad positiva ya que la carga  $Q$  y la diferencia de potencial  $\Delta V$  siempre se expresan como cantidades positivas. En el SI la capacitancia se expresa como coulombs por cada volt, la unidad para capacitancia es el faradio (F). [32]

- **Capacitor de placas paralelas.**

Dos placas metálicas paralelas de igual superficie de área  $A$  están separadas por una distancia  $d$ . Una placa tiene carga  $+Q$  y la otra tiene carga  $-Q$ . Si las placas están muy juntas, se puede suponer que el campo eléctrico es uniforme entre las placas y cero en cualquier otra parte [32].

En términos generales, se determina  $Q$  por medio de la Ley de Gauss que expresa la relación entre campo y carga neta en una superficie

$$\oiint_S \varepsilon \vec{E} \cdot \vec{dS} = Q \quad (0.8)$$

Por otro lado, al llevar una carga unitaria positiva de la superficie negativa a la positiva, por la relación campo-potencial eléctrico se tiene

$$\Delta V = - \int_-^+ \vec{E} \cdot \vec{dL} \quad (0.9)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.8 y 2.9 en la ecuación 2.7 se tiene

$$C = \frac{\oint \varepsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}}{- \int_-^+ \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L}} \quad (2.10)$$

Considerando que el campo es uniforme, su valor es constante por lo tanto se simplifica la ecuación 2.10:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (2.11)$$

Si  $\varepsilon$  y  $\varepsilon_0$  son las permitividades absolutas del dieléctrico y del vacío respectivamente, cuyas unidades son  $\frac{C^2}{N \times m^2}$ , la permitividad relativa  $\varepsilon_r$  se define como  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  y la permitividad del vacío  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  de la cual se deduce que  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ . Sustituyendo  $\varepsilon$  en la ecuación 2.11

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (2.12)$$

Es decir, la capacitancia de un capacitor de placas paralelas es proporcional al área de sus placas e inversamente proporcional a la separación de las placas [32].

La geometría de los conductores influye en la capacidad del par de placas para almacenar carga, a medida que un capacitor adquiere carga, los electrones fluyen hacia la placa negativa y salen de la placa positiva, entonces, si dichas placas poseen un área grande, las cargas acumuladas son capaces de distribuirse sobre dicha área de manera sustancial y la cantidad de carga que se puede almacenar aumenta conforme el área de la placa aumenta, entonces, es razonable que la capacitancia sea proporcional al área de placa  $A$ . [32]

Si se estudia la región que separa las placas y se colocan más cerca, el campo eléctrico tiene el mismo valor, pero se extiende sobre una distancia reducida, esto se traduce en que la magnitud de la diferencia de potencial entre las placas  $\Delta V$  es menor, en consecuencia, acercar más las placas hace que la carga sobre el capacitor aumente, si  $d$  disminuye, la carga disminuye, como resultado la relación entre  $C$  y  $d$  es razonable. [32]

- **Capacitores en paralelo.**

Cuando los capacitores están en paralelo, la capacitancia total es simplemente la suma de todas las capacitancias. [31]

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (2.13)$$

- **Capacitores en serie.**

Al conectar capacitores en serie, la capacitancia total es la suma inversa de la suma de todas las capacitancias inversas. [31]

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad (2.14)$$

- **Carga de un capacitor.**

Suponiendo que un capacitor se encuentra inicialmente descargado, es decir que el voltaje entre sus bornes es cero (0), y es conectado en un arreglo circuital RC sencillo (fuente,

resistencia y capacitor) se observara un paso de corriente que empezara a cargar el condensador de manera que una vez alcanzada la carga máxima la corriente en el circuito será cero (0) y el voltaje entre bornes del capacitor será igual al de la fuente que lo alimenta. La intensidad de corriente y la diferencia de potencial respecto al tiempo serán:

$$V_{C(t)} = E + (V_0 - E)e^{\frac{-t}{RC}} \quad (2.15)$$

$$I_{C(t)} = \frac{E - V_0}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (2.16)$$

Donde  $I_c$  es la corriente de carga en el capacitor,  $V_c$  es el voltaje en bornes del capacitor,  $V_0$  es el voltaje inicial en bornes del capacitor,  $E$  es el voltaje de la fuente,  $R$  es la resistencia conectada (resistencia de carga),  $C$  es la capacitancia del condensador y  $t$  representa el tiempo de carga [32].

- **Descarga de un capacitor.**

En este caso el capacitor se encuentra inicialmente cargado con voltaje entre sus bornes igual al de la fuente que lo alimentaba y desconectado de la fuente de alimentación, al conectarle una carga resistiva comienza a descargarse hasta que la diferencia de potencial entre bornes sea cero (0). La intensidad de corriente y la diferencia de potencial respecto al tiempo serán:

$$V_{C(t)} = V_0 e^{\frac{-t}{RC}} \quad (2.17)$$

$$I_{C(t)} = \frac{-V_0}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (2.18)$$

## 2.14 ULTRACAPACITOR

Denominado muchas veces como supercapacitor, capacitor de doble capa o capacitor electroquímico de doble capa, es un dispositivo de almacenamiento de energía el cual está compuesto por dos electrodos separados por un material aislante e inmerso en un electrolito y

la carga es almacenada en la interfaz entre el electrodo y el electrolito. Los supercapacitores almacenan hasta 10.000 veces más energía que los capacitores comunes y algunos pueden llegar hasta 3000 faradios (los normales suelen almacenar del orden de microfaradios), además poseen un gran rendimiento, almacenan mucha energía en relación a su peso (4Wh/kg), no presentan efecto de memoria y tienen una gran capacidad de carga y descarga rápida (5kW/kg) [33].

En una batería la energía es almacenada en forma de reacciones químicas en los electrodos y la energía eléctrica es liberada a través de una impedancia conectada a los terminales de la batería [33].

### **2.14.1 Ventajas y desventajas de los ultracapacitores**

#### **Ventajas**

El uso de los ultracapacitores supone ventajas técnicas y medioambientales, algunas de estas ventajas se muestran a continuación

- Los ciclos de carga y descarga de los ultracapacitores pueden ser mayor a 500.000 ciclos sin perder rendimiento, en cambio las baterías solo funcionan correctamente hasta cierta cantidad, aproximadamente 1000 ciclos.
- Los periodos de carga y descarga de los ultracapacitores son muy rápidos, a comparación de las baterías, que al funcionar por medio de reacciones electroquímicas necesitan de mayor cantidad de tiempo.
- Los ultracapacitores pueden ser fabricados en diferentes medidas y tamaños, por lo que los hace una tecnología muy flexible.
- Posee una alta eficiencia, superior al 95% [33]

#### **Desventajas**

- La densidad de energía de los ultracapacitores es menor a las baterías, aproximadamente almacenan una quinta o una décima parte de lo que almacena una batería

- Funcionan a bajos voltajes, un voltaje típico es 2,5 voltios; por lo tanto, para aplicaciones donde requieran voltajes superiores se deben realizar arreglos en serie, y un arreglo mayor a 3 ultracapacitores requiere balancear el voltaje.
- Posee una autodescarga considerablemente mayor. Pueden perder la mitad de la carga en aproximadamente un mes [33].

Debe señalarse que para la aplicación práctica de estos dispositivos nageradores, además del estudio previo de los capacitores ultracapacitores para lograr almacenar las cargas generadas, se requiere el conocimiento de las características eléctricas de entrada de los dispositivos móviles.

## 2.15. CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO MÓVIL

Unos de los aspectos a conocer para realizar este trabajo son los requerimientos de entrada de los dispositivos móviles como un teléfono celular, mp3, computadora y entre otros, como se muestra a continuación [34].

**Tabla 2.3. Requerimientos eléctricos de los dispositivos móviles [34].**

Dispositivo móvil	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Autonomía energética
Teléfono celular	3,7	$270,27027 \times 10^{-3}$	1	4 horas
MP3	3,7	$25,675 \times 10^{-3}$	0,095	15 horas
Marcapaso	2,8	$17,857 \times 10^{-6}$	$50 \times 10^{-6}$	7 años

El sistema de almacenamiento en este caso el capacitor requiere ser dimensionado de acuerdo a la carga (en C ó A·h) requerida para satisfacer las demandas de energía eléctrica de los dispositivos móviles. También se debe precisar si lo que se necesita es una carga total o parcial, como sería en el caso de una utilización de emergencia donde el requerimiento será de una carga parcial.

Si se utiliza como ejemplo el caso donde se requiere cargar parcialmente la batería de un teléfono celular para una llamada de emergencia, la carga a almacenar se calculará de acuerdo a los parámetros siguientes:

- Tiempo de uso de emergencia ( $\Delta t$ ) 60 segundos

- Intensidad de corriente promedio (  $I$ , ver Tabla 2.3),  $270,27 \times 10^{-3} \text{ A}$
- Voltaje de operación (  $V$ , ver Tabla 2.3),  $3,7 \text{ V}$

Con estos datos se calcula primero la carga  $Q$ , sustituyéndolos en la siguiente ecuación.

$$Q = I \cdot \Delta t \quad (2.19)$$

Cuyas dimensiones en el SI es de C, se obtiene  $Q = 16,2 \text{ C}$  esta será la carga a almacenar en el capacitor.

Luego para saber las dimensiones eléctricas del capacitor se emplea la fórmula 2.7 y sustituyendo los valores de  $Q$  y  $V$  se obtiene,  $C = 4,37 \text{ F}$ .

Con este resultado se seleccionará un ultracapacitor con estas dimensiones

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# CAPÍTULO III

## SELECCIÓN Y FABRICACIÓN DE LOS NANOGENERADORES TRIBOELÉCTRICOS (NGTE)

En este capítulo se aborda el proceso de la selección de los materiales, se elegirá los modos de los nanogeneradores y se detallará el desarrollo de la fabricación de los nanogeneradores para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación.

### 3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES

Tomando en cuenta la tabla 2.1 de la serie triboeléctrica, explicada en el capítulo II, se eligieron materiales accesibles y los más distantes posibles de la tabla para tener mejor efecto triboeléctrico. En una primera aproximación se empleó un péndulo construido artesanalmente como se muestra en la Figura 3.1 a

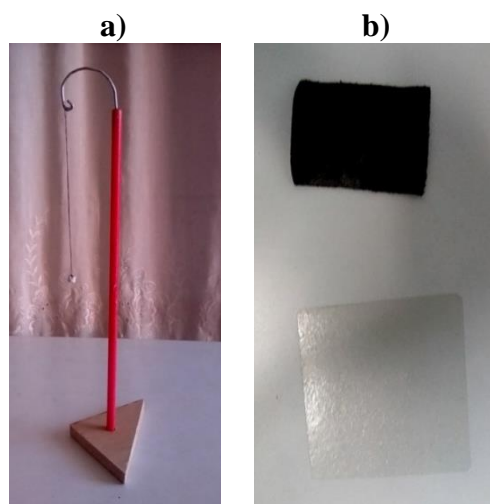


Figura 3.1 a) Péndulo artesanal y b) materiales seleccionados

Compuesto por una base aislante de madera y una esferita de papel suspendida por un hilo de algodón, seleccionando láminas de cuero, nylon, acrílico y acetato. Las cuales se ubican en la serie triboeléctrica de la siguiente manera: cuero número tres (3), Nylon número nueve (9), Acrílico número veintidós (22) y Acetato número treinta y uno (31), se realizaron tres (3) ensayos para visualizar la electrificación que se observa en las Figuras 3.3 y 3.4.

El procedimiento que se siguió fue frotar el cuero con el acrílico y el acetato, el nylon con el acrílico y el acetato, encontrando que el cuero con el acetato produjo mayor desviación en el péndulo detectando electrificación, por lo tanto, se descartaron los otros materiales y los seleccionados fueron el cuero y el acetato, como se muestra en la figura 3.1 b.

Para completar el proceso de selección de los materiales dieléctricos, se recurrió al laboratorio de física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de los Andes, la cual permitió gentilmente acceder a un electroscopio. A saber, el electroscopio es un instrumento que consta de: una plataforma metálica de captación, unida a esta una varilla metálica vertical fija, acoplada a esta varilla fija, en su punto medio va una varilla metálica liviana móvil que gira en torno a un eje que pasa por ese punto medio y todo este conjunto está ensamblado en un marco circular que tiene una escala en grados sexagesimal

Cuando se coloca sobre la plataforma de captación del electroscopio el cuerpo cargado, cargas de igual naturaleza aparecen en la varilla fija y la móvil. Debido a las fuerzas repulsivas de coulomb, se genera un torque que hace que la varilla móvil gire y señale un cierto valor en la escala [35], como se ilustra en la figura 3.2.



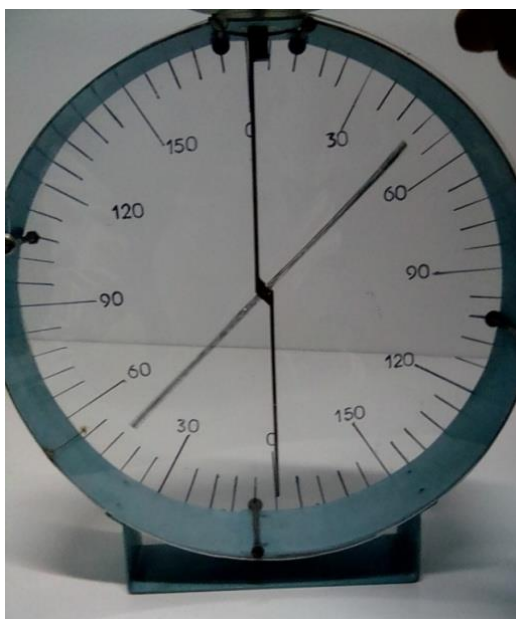
**Figura 3.2 Electroscopio**

Se realizó la prueba de frotar los materiales cuero y acrílico, se detectó una desviación como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3 Detección de la carga en el electroscopio de los materiales cuero y acrílico**

Luego se realizó otra prueba frotando los materiales cuero y acetato, se detectó una desviación como se muestra en la figura 3.4.



**Figura 3.4 Detección de la carga en el electroscopio de los materiales cuero y acetato**

**Tabla 3.1 Detección de la carga en los distintos materiales en grados**

<b>Materiales utilizados</b>	<b>Deflexión en grados</b>
Cuero y acrílico	26
Cuero y acetato	48

Visto los resultados de este proceso que se refleja en la Tabla 3.1, se decidió utilizar el cuero y el acetato como materiales dieléctricos ya que estos mostraban la mayor deflexión (48 °), con respecto al cuero y acrílico que reflejaron (26 °)

### **3.2 SELECCIÓN DE LOS MODOS DE NANOGENERACIÓN TRIBOELÉCTRICA**

Tomando en cuenta las condiciones de operación tanto en localización como en forma de movimiento, se seleccionaron dos modelos con el fin de comparar su rendimiento y además verificar la viabilidad de adaptarlo para un uso práctico:

Nanogenerador triboeléctrico de dos electrodos o electrodo adjunto NGTE dieléctrico a dieléctrico, que lo llamaremos (modelo 1) y el nanogenerador triboeléctrico de un solo electrodo o también llamado simple electrodo NGTESE conductor a dieléctrico (modelo 2).

### **3.3 FABRICACIÓN DE LOS NANOGENERADORES**

#### **3.3.1 Fabricación del NGTE electrodo adjunto (Modelo 1)**

Este dispositivo consta de dos partes: Una parte fija y una parte móvil. La parte fija está compuesta por una lámina de acetato (dieléctrico), una lámina de cobre (electrodo) y una placa de vidrio (sustrato), se recortaron cada una de ellas cuyas longitudes y anchos se muestran en la tabla 3.2.

Los espesores del cuero, el acetato, el vidrio y de los electrodos de cobre se realizaron con un tornillo micrométrico en el laboratorio de física y las longitudes y los anchos se midieron con una regla como se muestra en la figura 3.5.



**Figura 3.5. Instrumentos de medida a) tornillo micrométrico y b) regla.**

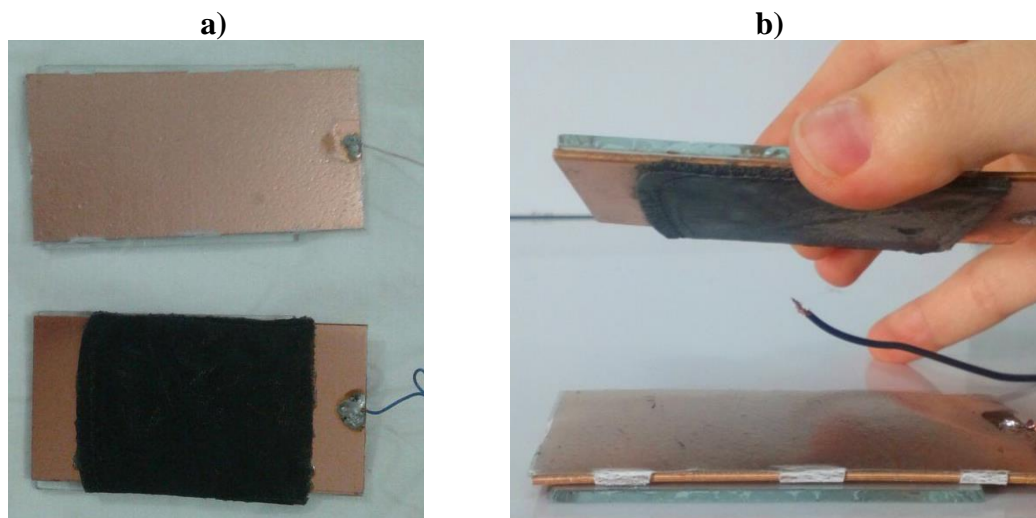
La parte móvil está compuesta por un parche de cuero (dieléctrico), una lámina de cobre (electrodo) y una placa de vidrio (sustrato), también recortadas cuyas longitudes y anchos se observan en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Parámetros utilizados para el modelo 1.**

Dieléctrico 1 (cuero)	$d_1 = 1,05 \text{ mm}$
Dieléctrico 2 (acetato)	$d_2 = 0,29 \text{ mm}$
Espesor de los electrodos de cobre	$d_c = 1,83 \text{ mm}$
Ancho del dieléctrico 1, dieléctrico 2, los electrodos y el vidrio	$w_1 = 7 \text{ cm}$ , $w_2 = 10 \text{ cm}$ , $w_e = 10 \text{ cm}$ , $w_v = 8 \text{ cm}$
Longitud del dieléctrico 1, dieléctrico 2, los electrodos y el vidrio	$L_1 = 5 \text{ cm}$ , $L_2 = 5 \text{ cm}$ , $L_e = 5 \text{ cm}$ , $L_v = 5 \text{ cm}$

Para la construcción de la parte fija se adhirió la lámina de acetato a la lámina de cobre utilizando como pegamento silicón líquido, previamente se soldó con estaño un terminal a la lámina de cobre usando un caufín, posteriormente se adhirió la placa de vidrio a la lámina de cobre también utilizando como pegamento silicón líquido.

Similarmente al caso anterior para la construcción de la parte móvil, se procedió a juntar mediante silicón líquido el parche de cuero a la lámina de cobre y luego a la placa de vidrio, también se soldó a la lámina de cobre un terminal utilizando un caufín, como se ilustra es la figura 3.6



**Figura 3.6** Fabricación del modelo 1 a) vista superior y b) vista lateral.

### 3.3.2 Fabricación del NGTESE conductor a dieléctrico (Modelo 2)

Este dispositivo también consta de dos partes: Una parte fija y otra parte móvil. La parte fija es un conjunto de dos láminas, una de aluminio (electrodo primario) y otra lámina de cobre (electrodo de referencia), emplazadas paralelamente por medio de dos separadores de madera. La parte móvil está compuesta por una lámina de acetato (dieléctrico), una placa de vidrio (sustrato) y un asa de madera de sujeción, se recortaron cada una de ellas y sus parámetros se muestran en la tabla 3.3.

Para la construcción de la parte fija se adhirieron los dos separadores de madera al electrodo de referencia utilizando silicón líquido, luego encima de los separadores se pegó el electrodo primario de tal manera que quede perfectamente paralela a la lámina de cobre. Previamente a la lámina de cobre se le soldó un terminal con cautín, y a la lámina de aluminio o electrodo primario se le practicó una saliente para encajar un terminal tipo hembra 12-16 sin aislamiento, como se muestra en la figura 3.7.

Posteriormente para la construcción de la parte móvil se adhirió la lámina de acetato con la superficie interior de la placa de vidrio, utilizando como pegamento el silicón líquido, luego se adjuntó el asa de madera a la superficie exterior de la placa de vidrio utilizando el mismo pegamento.

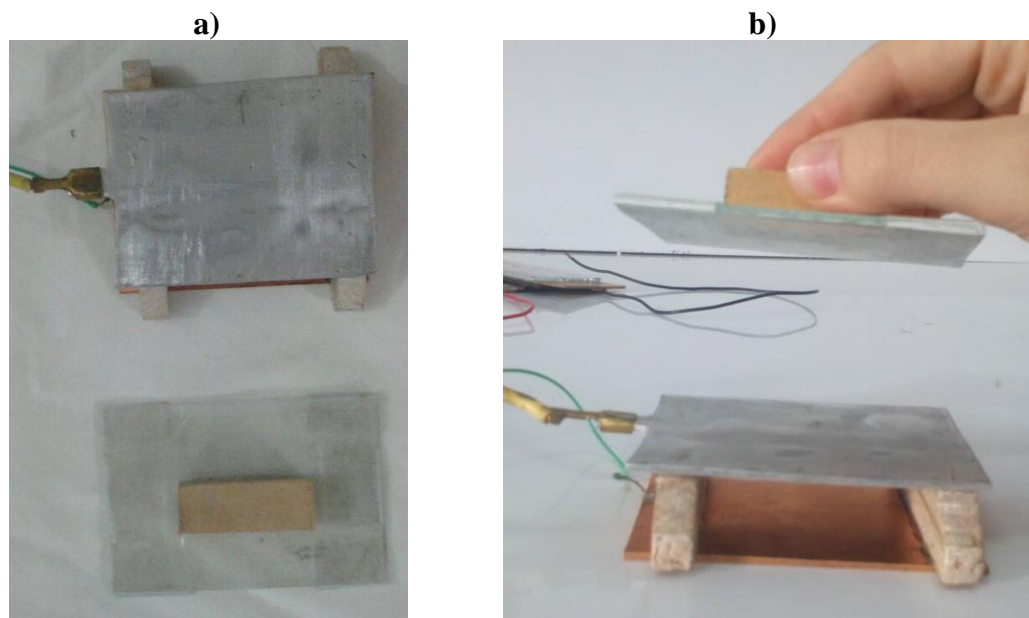


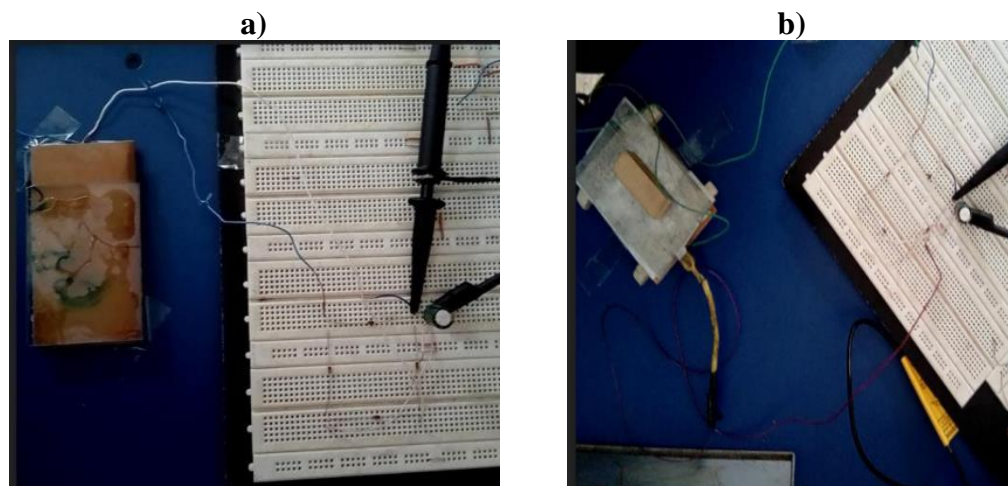
Figura 3.7 Fabricación del modelo 2 a) vista superior y b) vista lateral.

Tabla 3.3 Parámetros utilizados para el modelo 2.

Dieléctrico 1 (acetato)	$d_1 = 0,29 \text{ mm}$
Espesor del electrodo primario y electrodo de referencia	$d_{AL} = 2,15 \text{ mm}$ , $d_c = 1,83 \text{ mm}$
Ancho del dieléctrico 1, electrodo primario, electrodo de referencia y el vidrio	$w_1 = 10 \text{ cm}$ , $w_{AL} = 10 \text{ cm}$ , $w_c = 10 \text{ cm}$ , $w_v = 10 \text{ cm}$
Longitud del dieléctrico 1, electrodo primario, electrodo de referencia y el vidrio	$L_1 = 5 \text{ cm}$ , $L_{AL} = 5 \text{ cm}$ , $L_c = 5 \text{ cm}$ , $L_v = 5 \text{ cm}$
Distancia de separación entre electrodos (separadores de madera)	$g = 2 \text{ cm}$

### 3.4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE RECOLECTOR DE ENERGÍA POR TRIBOELECTRIFICACIÓN

Este sistema se compone de tres elementos principales, el primer elemento es el NGTE (modelo 1 o modelo 2), un segundo elemento denominado administrador de energía el cual está conformado por un puente rectificador que consta de cuatro (4) diodos 4148, los cuales fueron elegidos por generar una pequeña caída de voltaje, con el fin de minimizar las pérdidas y obtener mejor rendimiento. La función del puente rectificador es convertir la señal alterna del NGTE en continua, ya que lo que busca es alimentar dispositivos electrónicos.



**Figura 3.8** Arquitectura del sistema de recolector de energía de los dos modelos a) Modelo 1 b) Modelo 2.

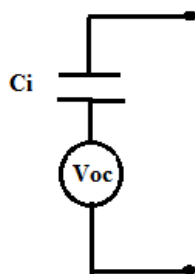
El tercer elemento es un dispositivo de almacenamiento de energía que en este caso se utilizó capacitores para los ensayos en laboratorio de valores de  $2,2 \mu\text{F}$ ,  $4,7 \mu\text{F}$ ,  $10 \mu\text{F}$ ,  $47 \mu\text{F}$  y  $4700 \mu\text{F}$  [36]. Por último, estos elementos se ensamblan como aparece en la figura 3.8 utilizando un *protoboard* para su funcionamiento.

### 3.5 ENSAYOS DEL SISTEMA EN EL LABORATORIO

Se realizaron los siguientes ensayos divididos en tres bloques:

- Ensayos a circuito abierto por contacto y fricción para los NGTE modelo 1 y modelo 2.
- Ensayos a corto circuito por contacto y fricción para los NGTE modelo 1 y modelo 2.
- Ensayos de todo el sistema (incluyendo el puente rectificador) para los NGTE modelo 1 y 2, con diferentes capacitores de almacenamiento.

#### 3.5.1 Ensayo a circuito abierto del modelo 1 y modelo 2



**Figura 3.9** Circuito equivalente a OC.

Donde  $C_i$ , es la capacidad interna del nanogenerador.

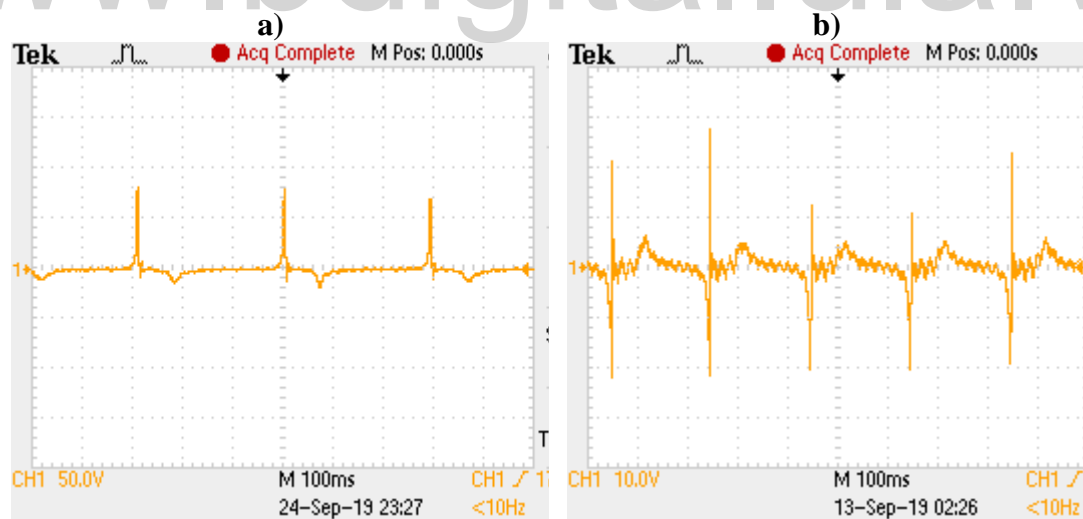
- **Equipos utilizados**

Osciloscopio (Tektronix TDS 2024B Osciloscopio digital de cuatro canales 200 MHz 2  $GS/s$ ), punta de prueba, *protoboard*, conectores y multímetro.

- **Procedimiento**

Se desconecta el nanogenerador modelo 1 y modelo 2 de todo el sistema recolector de energía, luego se conectan las terminales del nanogenerador modelo 1 a un osciloscopio mediante una punta de prueba. Después se procede a accionar la parte móvil del nanogenerador de forma manual por contacto y por fricción arrojando las señales como se muestra en la figura 3.10 y en la figura 3.11, completando aproximadamente veinte (20) ciclos mecánicos a una frecuencia promedio de  $<5$  Hz. Después se repite el mismo procedimiento para el nanogenerador modelo 2.

- **Por contacto separación vertical del modelo 1 y modelo 2**



**Figura 3.10** Ensayo de circuito abierto por contacto de ambos modelos a) modelo 1 b) modelo 2.

Utilizando el multímetro por contacto para el modelo 1 se obtuvo un voltaje de  $V_{oc1} = 11,8$  V a los 5 segundos y para el modelo 2 por contacto se obtuvo  $V_{oc2} = 2,8$  V a los 4 segundos.

- Por fricción modelo 1 y modelo 2

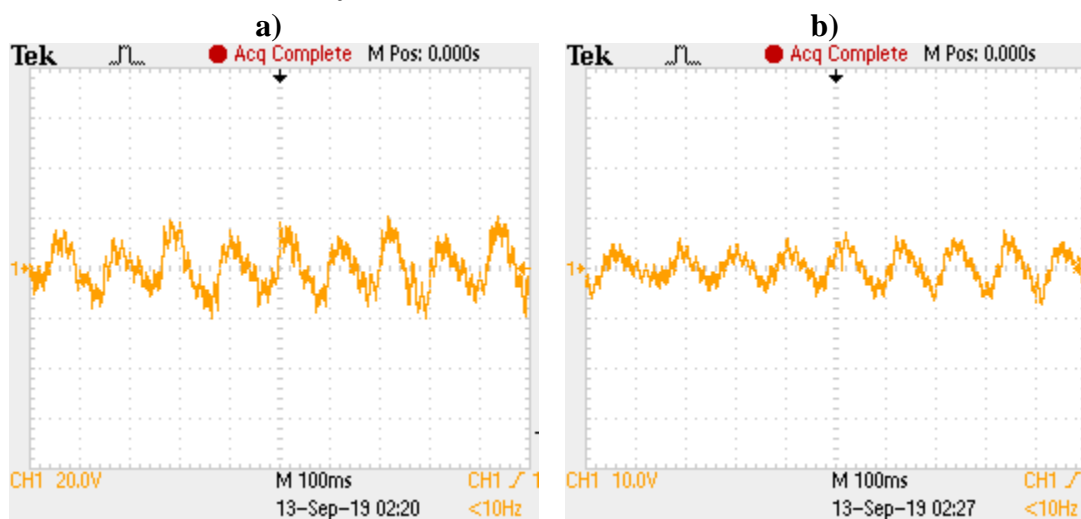


Figura 3.11 Ensayo de circuito abierto por fricción de ambos modelos a) modelo 1 b) modelo 2.

Utilizando el multímetro por fricción para el modelo 1 se obtuvo un voltaje de  $V_{oc1} = 10,2 \text{ V}$  a los 5 segundos y para el modelo 2 por fricción se obtuvo  $V_{oc2} = 2 \text{ V}$  a los 8 segundos.

### 3.5.2 Ensayo de corto circuito del modelo 1 y modelo 2

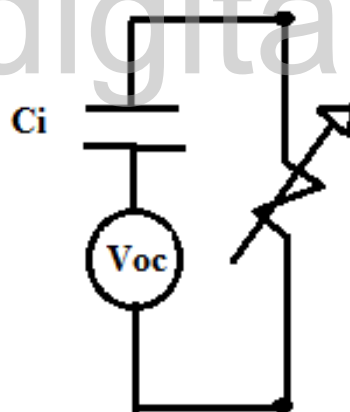


Figura 3.12 Circuito equivalente a CC.

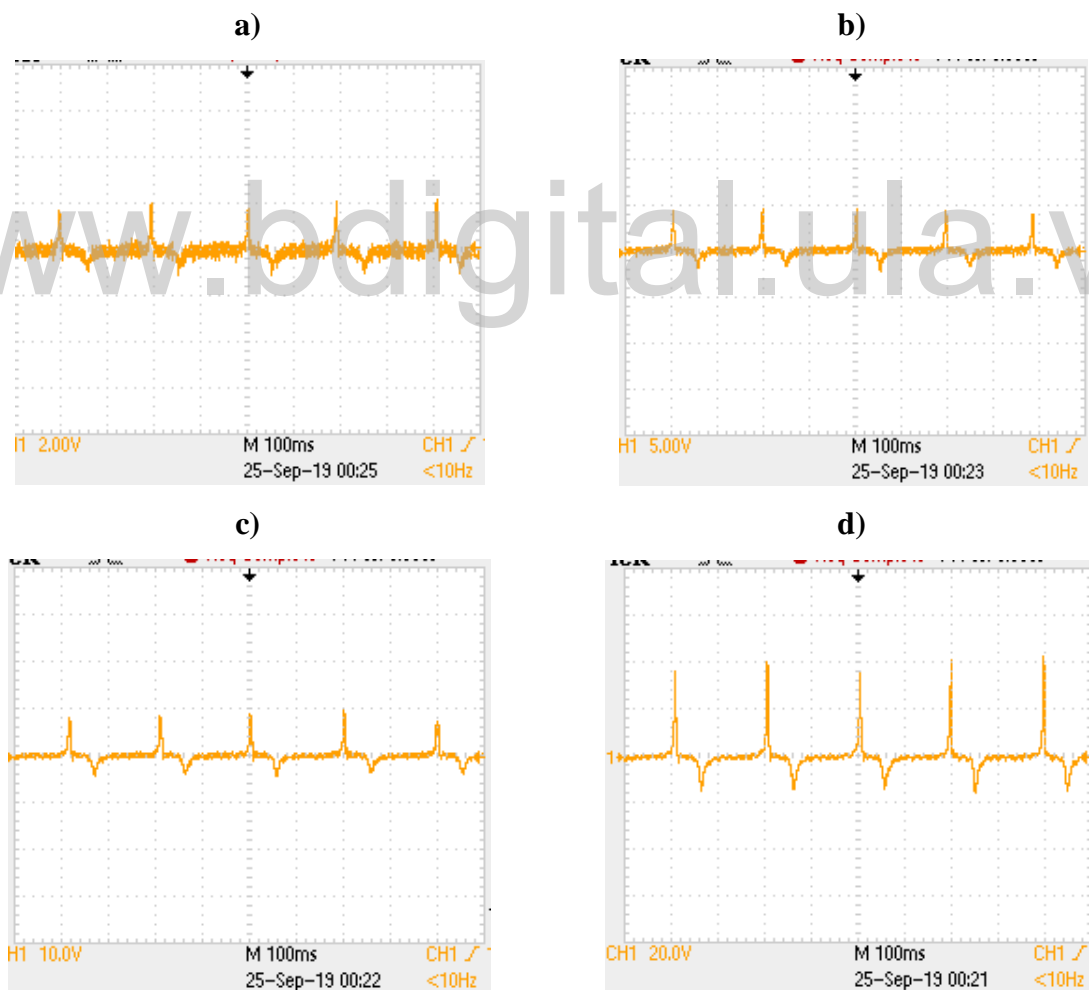
- Equipos utilizados

Osciloscopio (Tektronix TDS 2024B Osciloscopio digital de cuatro canales 200MHz  $2 \text{ Gs/s}$ ), punta de prueba, *protoboard*, resistencias y caja decádica

- **Procedimiento**

Con los nanogeneradores modelo 1 y modelo 2 desconectados de todo sistema recolector de energía, se conectan las terminales del nanogenerador modelo 1 a diferentes valores de resistencias, y luego a un osciloscopio mediante una punta de prueba. Después se procede a accionar la parte móvil del nanogenerador de forma manual por contacto y posteriormente por fricción tomando lectura para cada caso como se muestra en la figura 3.13 y en la figura 3.15, completando aproximadamente diez (10) ciclos mecánicos a una frecuencia promedio de <5 Hz. Después se repite el mismo procedimiento para el nanogenerador modelo 2 y las señales se muestran en la figura 3.14 y 3.16 respectivamente.

- **Por contacto modelo 1**



**Figura 3.13** Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 1 con varias resistencias a)  $R = 20 \text{ k}\Omega$ , b)  $R = 50 \text{ k}\Omega$ , c)  $R = 100 \text{ k}\Omega$ , d)  $R = 500 \text{ k}\Omega$

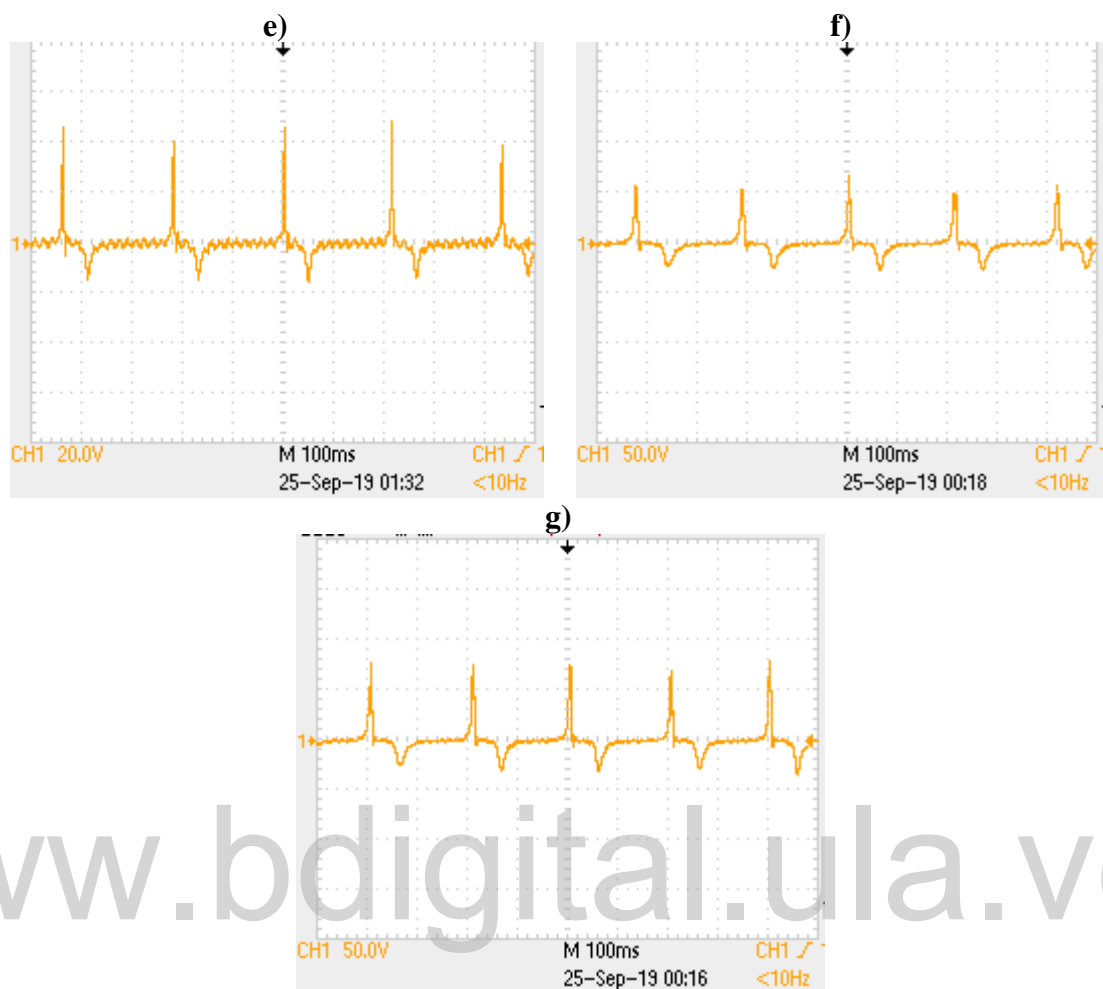


Figura 3.13 Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 1 con varias resistencias e)  $R= 800 \text{ k}\Omega$ , f)  $R= 18 \text{ M}\Omega$  y g)  $R= 36 \text{ M}\Omega$  (Continuación)

- Por contacto modelo 2

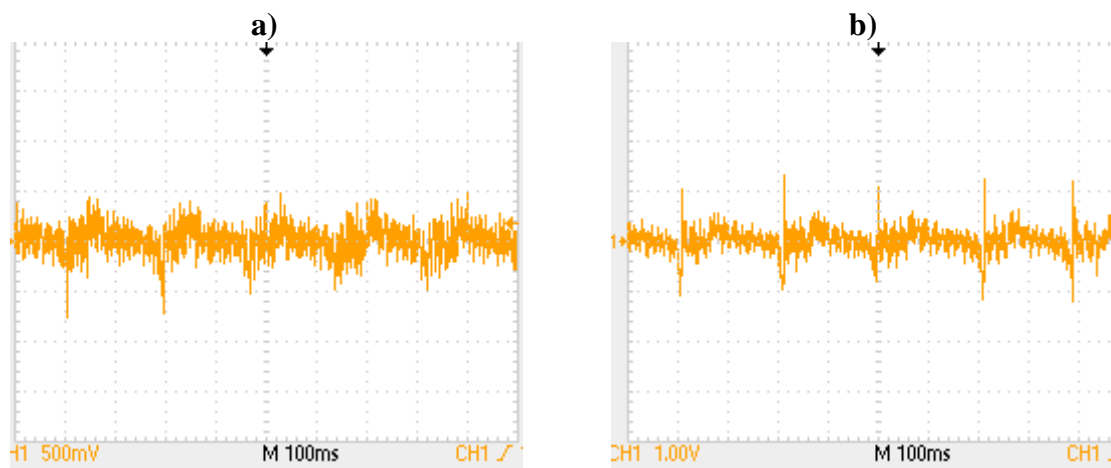


Figura 3.14 Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 2 con varias resistencias a)  $R= 20 \text{ k}\Omega$ , b)  $R= 50 \text{ k}\Omega$

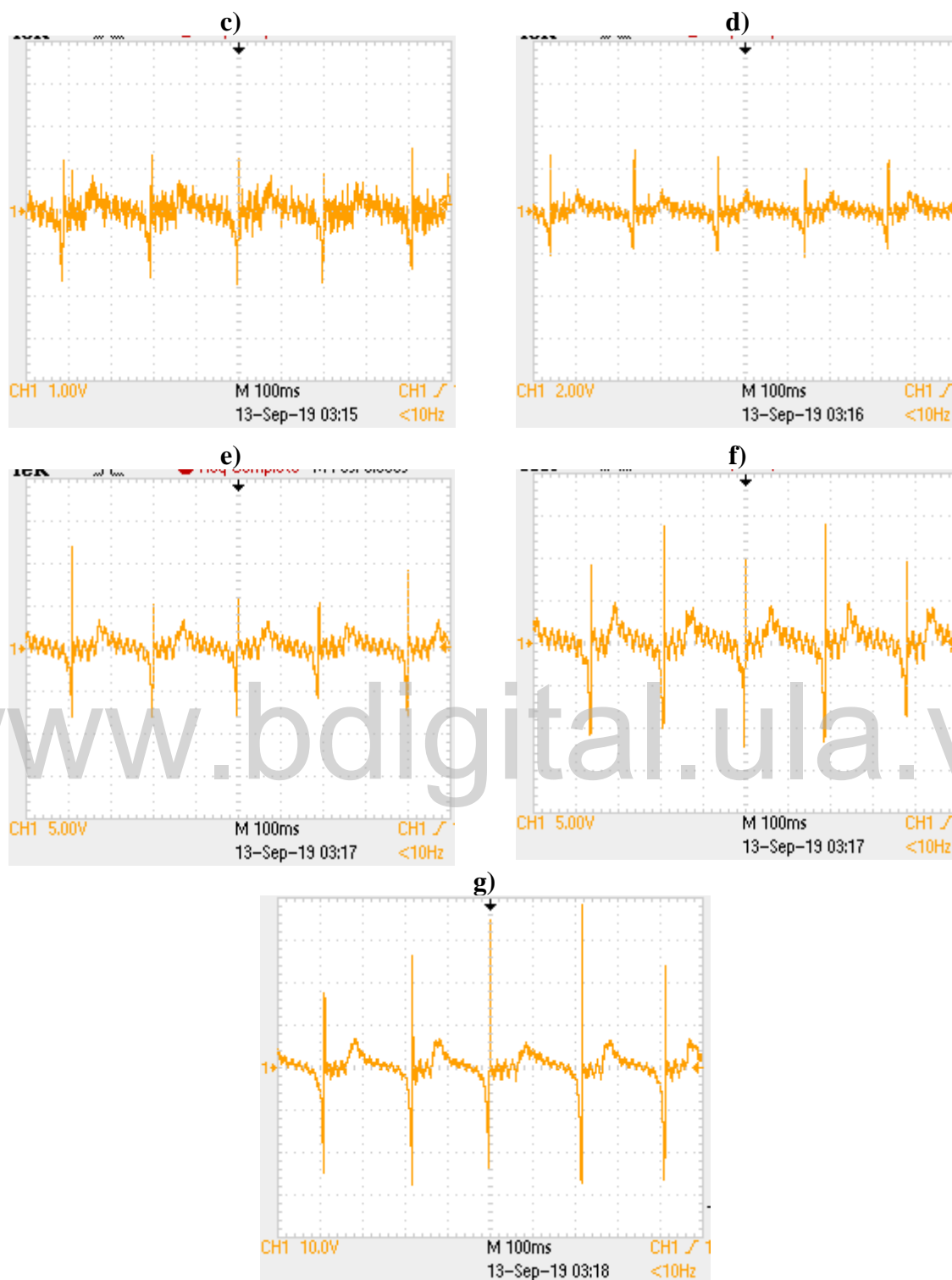
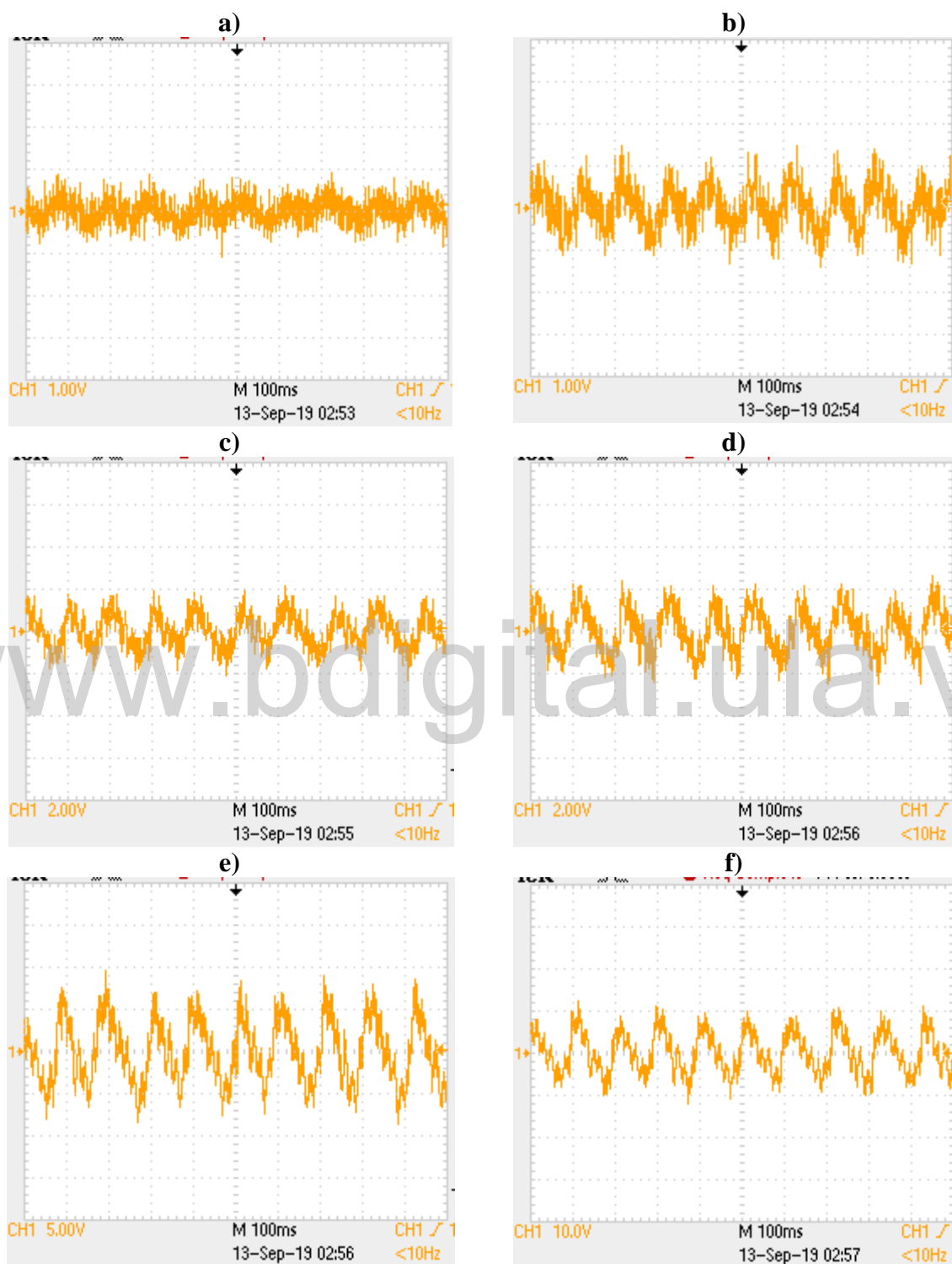


Figura 3.14 Ensayo de corto circuito por contacto del modelo 2 con varias resistencias c)  $R= 100$   $k\Omega$ , d)  $R= 500$   $k\Omega$ , e)  $R=800$   $k\Omega$ , f)  $R= 18$   $M\Omega$  y g)  $R= 36$   $M\Omega$  (Continuación)

- Por fricción modelo 1



**Figura 3.15** Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 1 con varias resistencias a)  $R = 20 \text{ k}\Omega$ , b)  $R = 50 \text{ k}\Omega$ , c)  $R = 100 \text{ k}\Omega$ , d)  $R = 500 \text{ k}\Omega$ , e)  $R = 800 \text{ k}\Omega$ , f)  $R = 18 \text{ M}\Omega$

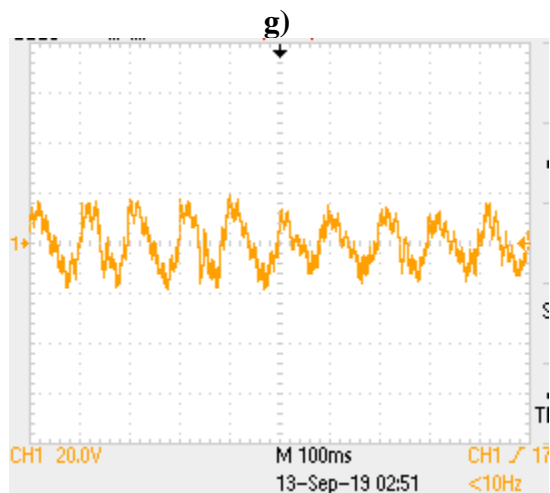


Figura 3.15 Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 1 con varias resistencias g)  $R= 36 \text{ M}\Omega$  (Continuación)

- Por fricción modelo 2

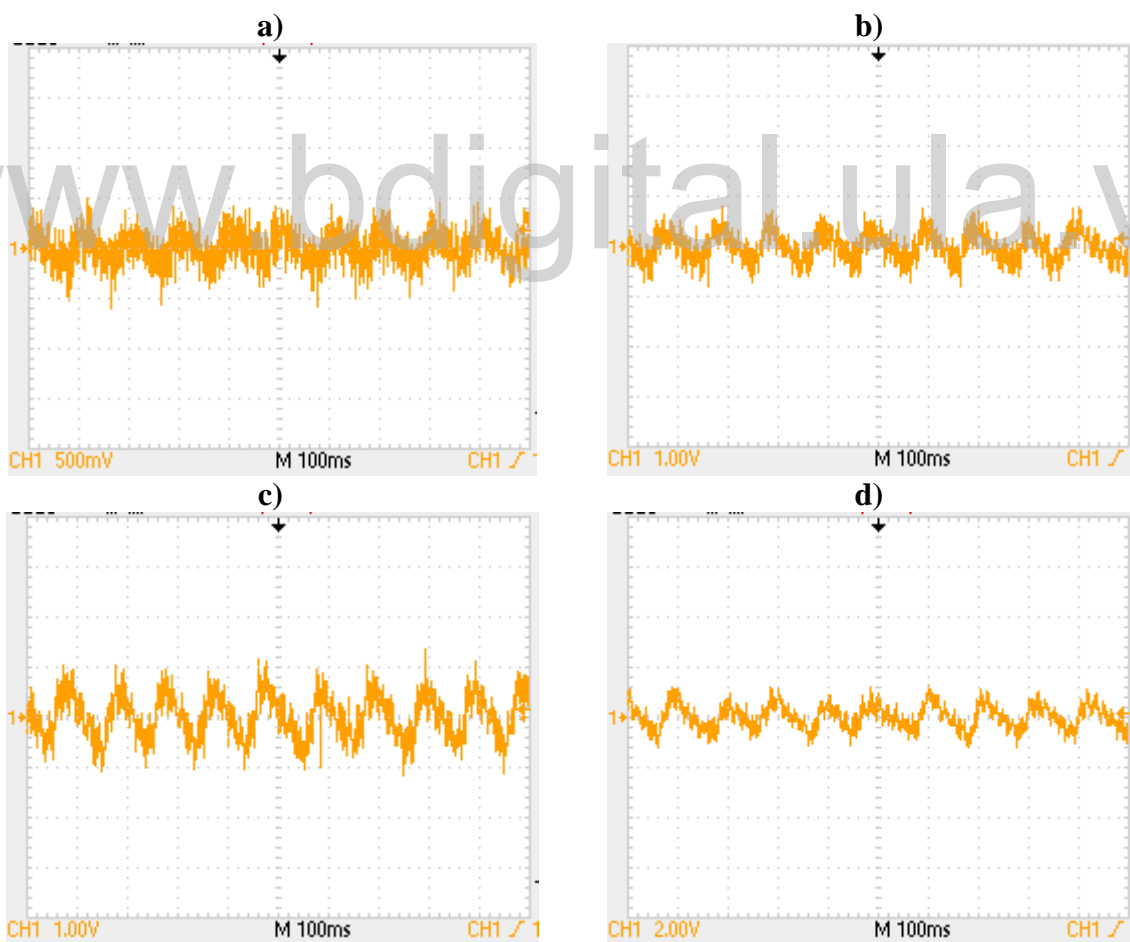


Figura 3.16 Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 2 con varias resistencias a)  $R= 20 \text{ k}\Omega$  , b)  $R= 50 \text{ k}\Omega$ , c)  $R= 100 \text{ k}\Omega$ , d)  $R= 500 \text{ k}\Omega$

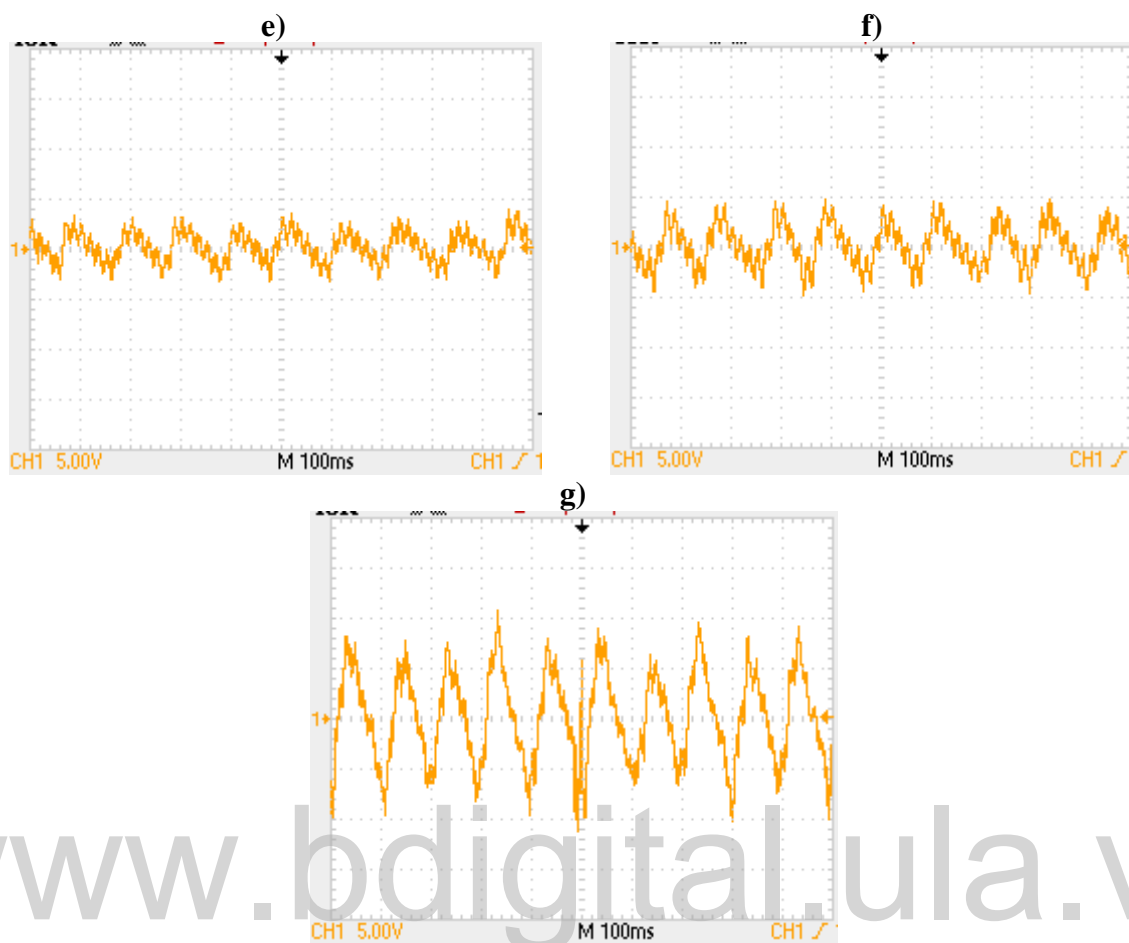


Figura 3.16 Ensayo de corto circuito por fricción del modelo 2 con varias e)  $R= 800K\Omega$ , f)  $R= 18 M\Omega$  y g)  $R= 36 M\Omega$  (Continuación)

### 3.5.3 Ensayos con todo el sistema conectado del modelo 1 y modelo 2

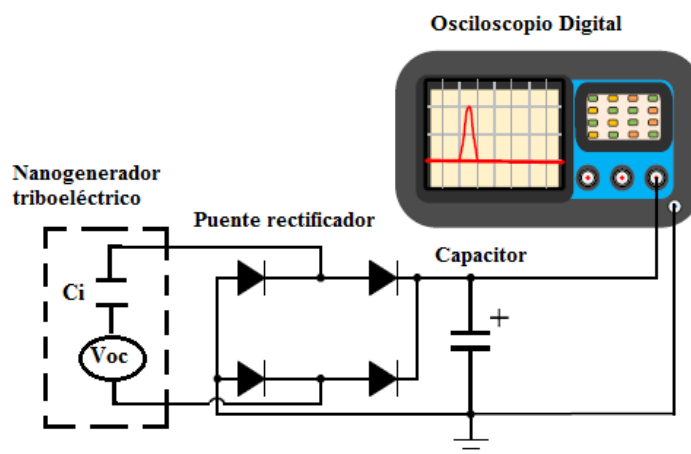
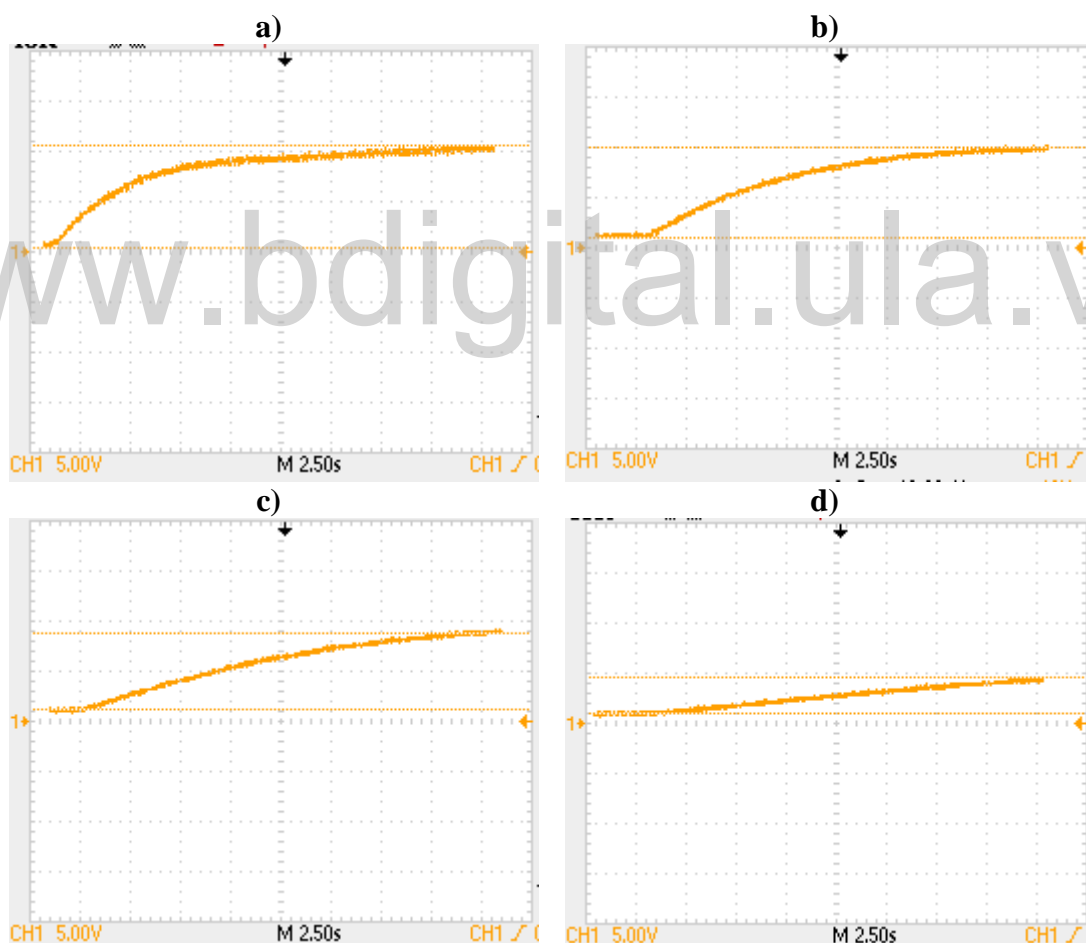


Figura 3.17 Todo el sistema conectado.

- **Procedimiento**

Se configura el sistema recolector de energía, conectando en nanogenerador modelo 1 con el puente rectificador, y sus terminales se conectaron a diferentes valores de capacitores de almacenamiento, y luego al osciloscopio. Después se procede a accionar el componente móvil del nanogenerador de forma manual por contacto y por fricción registrando valores para cada caso respectivamente como se muestra en la figura 3.18 y en la figura 3.20, completando aproximadamente veinte (20) ciclos mecánicos a una frecuencia promedio de  $<5$  Hz. Después se repite el mismo procedimiento para el nanogenerador modelo 2 y las señales se muestran en la figura 3.19 y 3.21.

- **Por contacto modelo 1**



**Figura 3.18. Ensayo con todo el sistema conectado por contacto del modelo 1 con varios capacitores a)  $C=2,2 \mu\text{F}$ , b)  $C=4,7 \mu\text{F}$ , c)  $C=10 \mu\text{F}$  y d)  $C=47 \mu\text{F}$**

- Por contacto modelo 2

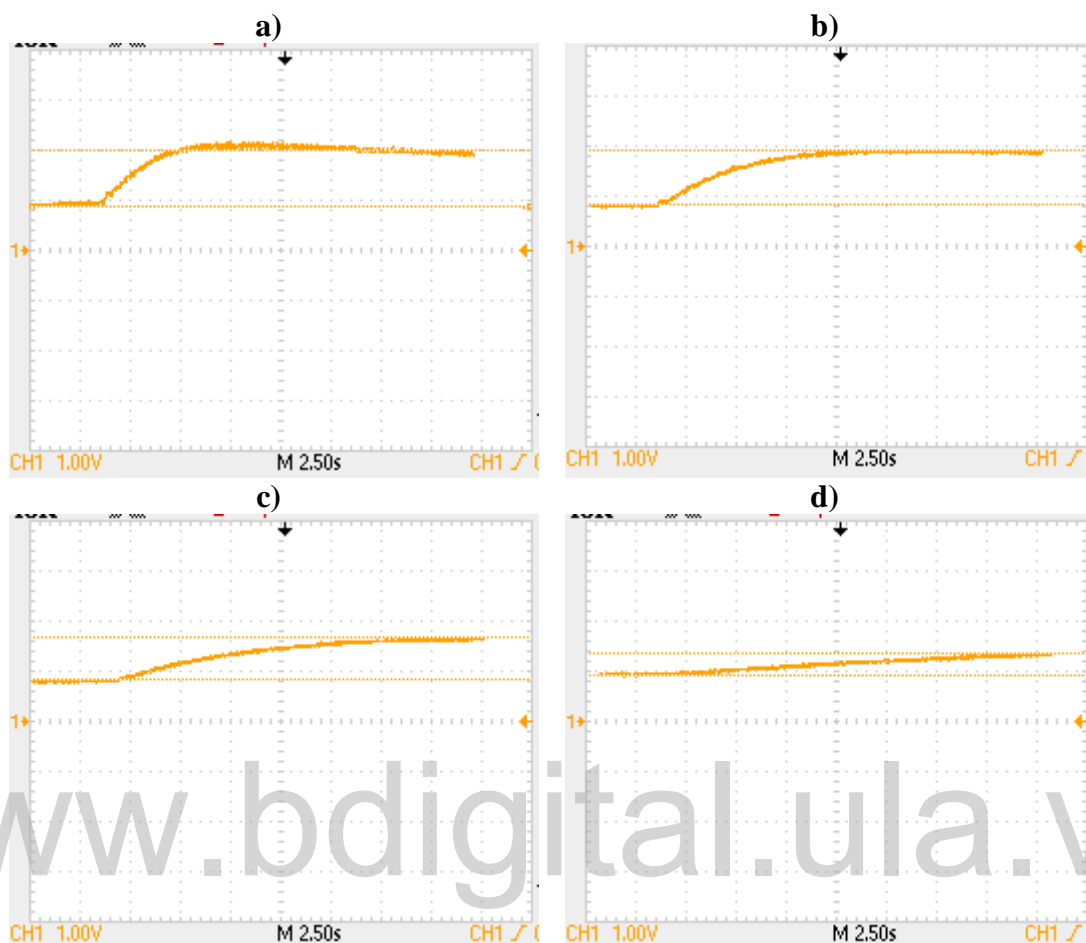


Figura 3.19. Ensayo con todo el sistema conectado por contacto del modelo 2 con varios capacitores a)  $C=2,2 \mu\text{F}$ , b)  $C=4,7 \mu\text{F}$ , c)  $C=10 \mu\text{F}$  y d)  $C=47 \mu\text{F}$

- Por fricción modelo 1

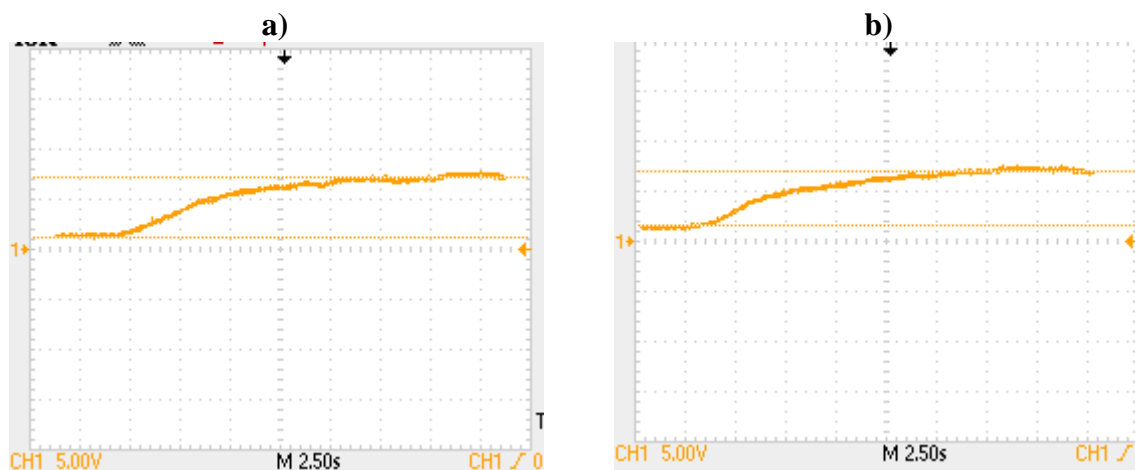


Figura 3.20. Ensayo con todo el sistema conectado por fricción del modelo 1 con varios capacitores a)  $C=2,2 \mu\text{F}$ , b)  $C=4,7 \mu\text{F}$

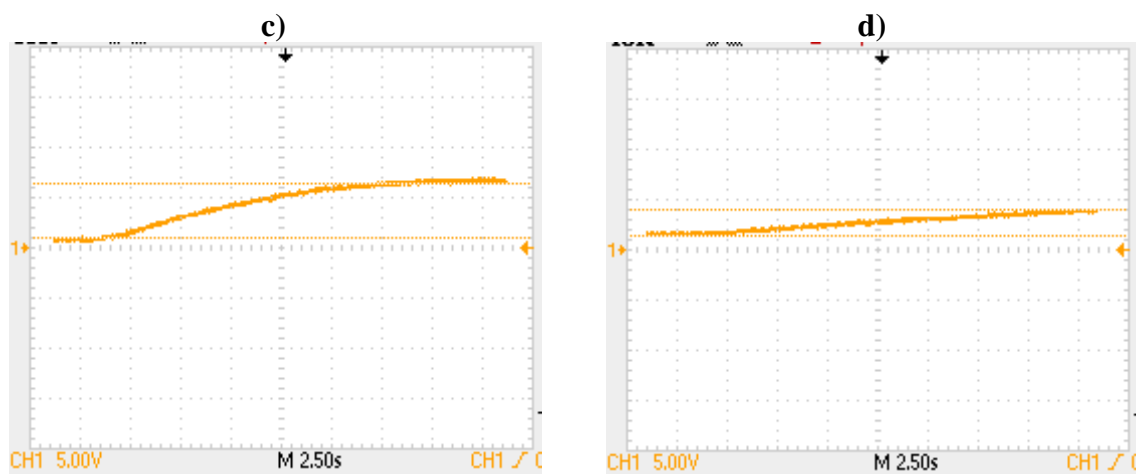


Figura 3.20. Ensayo con todo el sistema conectado por fricción del modelo 1 con varios capacitores c)  $C= 10 \mu\text{F}$  y d)  $C= 47 \mu\text{F}$  (Continuación)

- Por fricción modelo 2

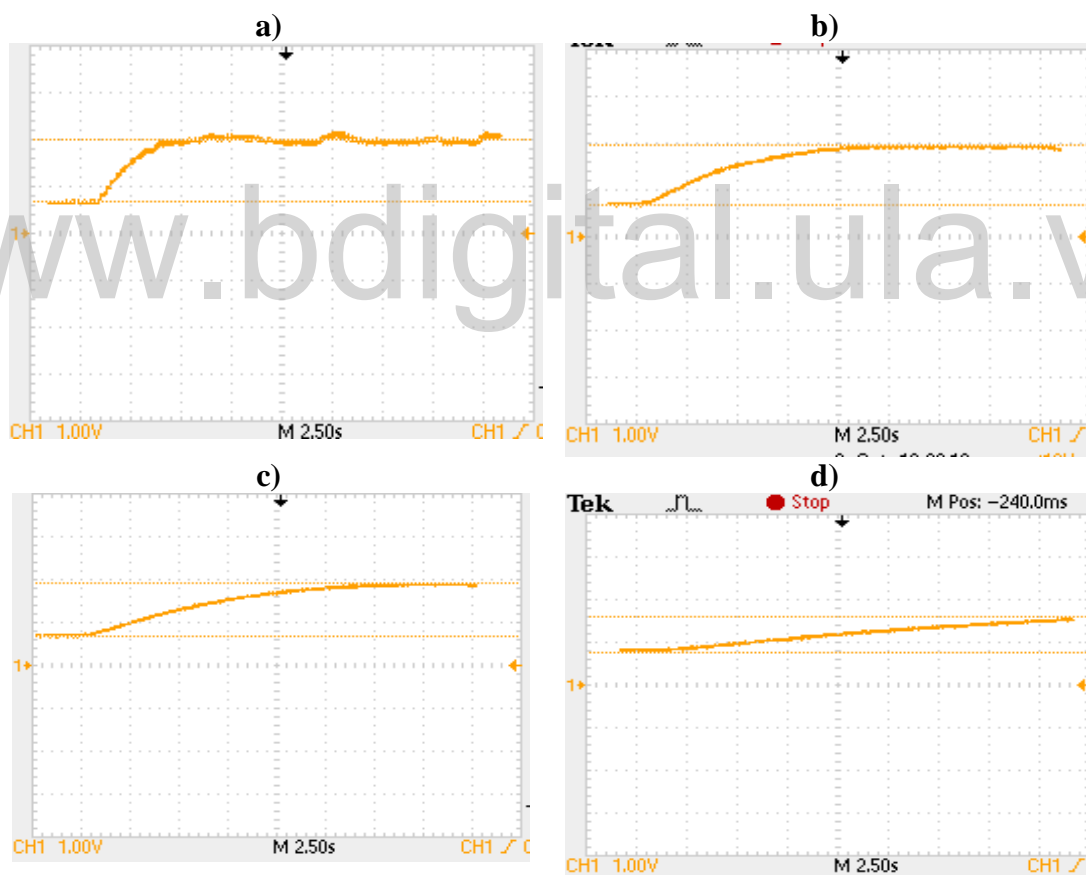


Figura 3.21. Ensayo con todo el sistema conectado por fricción del modelo 2 con varios capacitores a)  $C= 2,2 \mu\text{F}$ , b)  $C= 4,7 \mu\text{F}$ , c)  $C= 10 \mu\text{F}$  y d)  $C= 47 \mu\text{F}$

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se analizará los resultados de cada uno de los ensayos desarrollados en el laboratorio: circuito abierto, corto circuito y todo el sistema conectado.

### 4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 4.1.1 Ensayos a circuito abierto

En el caso de operación a modo de contacto para ambos modelos, se aprecia en la figura 3.10 en el capítulo III un pico de magnitud de ochenta voltios (80 V) para el modelo 1 y de veinte voltios (20 V) para el modelo 2 observando una considerable diferencia de sesenta voltios (60 V) entre los dos modelos. Con el multímetro se obtuvo 11,8 V para el modelo 1 y 2,8 V para el modelo 2, con una diferencia de nueve voltios (9 V). Estos resultados concuerdan con la teoría desarrollada en el capítulo II, esto es debido a su influencia en la distribución del campo eléctrico alrededor de los electrodos es pequeña en el modelo 2, por lo tanto, un mayor aumento de la distancia de separación ( $X$ ) contribuirá poco al aumento del voltaje, donde se confirma las tendencias obtenidas experimentalmente. Luego, analizando la figura 3.11 del capítulo III los resultados cuando se opera en el modo de fricción para ambos modelos, se puede observar claramente un pico de tensión de veinte voltios (20 V) en el modelo 1 y de ocho voltios (8 V) para el modelo 2, obteniendo una diferencia de doce voltios (12 V) y con el multímetro se obtuvo para el modelo 1 de 10,2 V y dos voltios (2 V) para el modelo 2 obteniendo una diferencia de 8,2 V. Estos resultados confirman lo mencionado anteriormente.

A la vista de estos resultados obtenidos y tomando en cuenta que se requiere un voltaje de salida mayor a dos voltios (2 V) para cumplir con el objetivo específico de encender un led durante 10 segundos con el fin de demostrar el funcionamiento del sistema recolector, el

prototipo a utilizar, por mostrar el mejor perfil de voltaje, es el que corresponde al modelo NGTE (modelo 1).

#### 4.1.2 Ensayos a corto circuito

Como no ha sido posible medir directamente la corriente con resistencia cero, por lo que estos nanogeneradores poseen una resistencia muy alta. Los datos obtenidos de las figuras 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 del capítulo III de los voltajes en cada medición se dividieron entre las resistencias correspondientes y se obtuvieron las corrientes respectivas (aplicación de la ley de OHM). Esos valores se llevaron a excel y se obtuvo las Figuras 4.1 y 4.2, suponiendo una distribución lineal se hizo un ajuste de la curva y extrapolando con resistencia igual a cero para el modelo 1 y 2 por contacto  $R=0 \Omega$ ,  $I_{CC1} = 86,2 \mu A$  y  $I_{CC2} = 9,71 \mu A$ . Para el modo de fricción  $I_{CC1} = 9,72 \mu A$  y  $I_{CC2} = 9,33 \mu A$ .

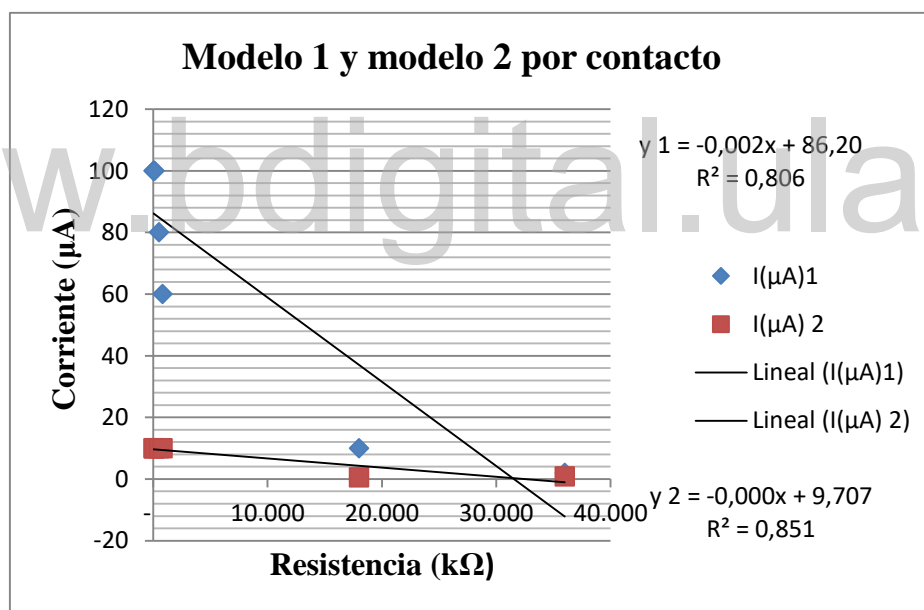
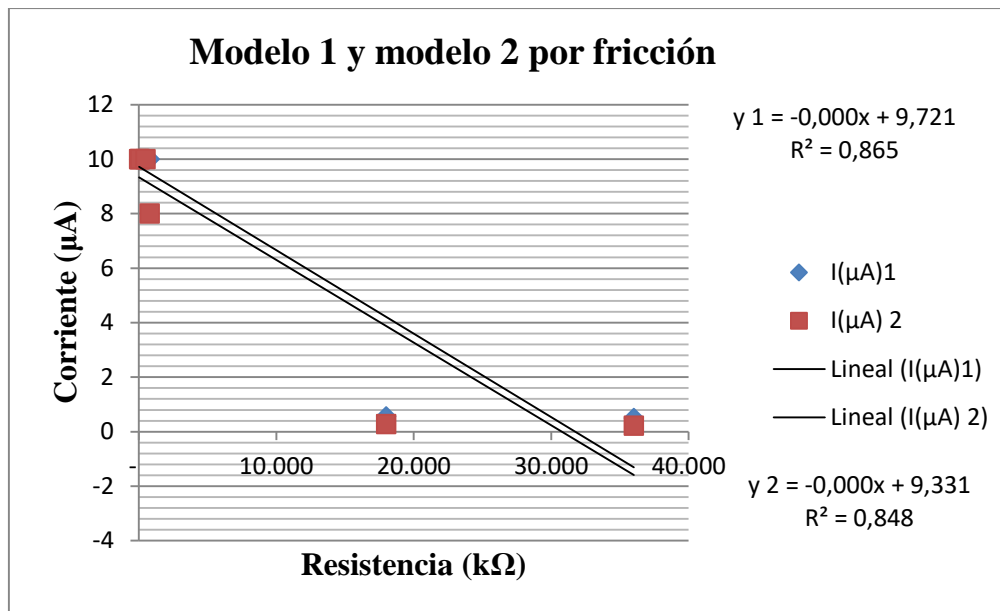


Figura 4.1. Corriente, del modelo 1 y 2 por contacto.

Como se observa en las figuras 4.1 y 4.2, para el caso de modo de contacto-separación se obtiene mayor corriente de corto circuito, en ambos modelos, con respecto al modo de fricción, evidenciando que existe una relación que es directamente proporcional entre el voltaje y la corriente (Ley de Ohm), consecuentemente con esto se concluye que, en el modo de contacto-separación, se obtiene el mayor valor de voltaje (mayor corriente) y en el modo de fricción se consigue menos voltaje (menos corriente).



**Figura 4.2. Corriente, del modelo 1 y 2 por fricción.**

Dado que se tiene una restricción en cuanto al movimiento, que está relacionado con la localización y la adaptación a la parte del cuerpo humano en el cual va ubicado este sistema recolector (debajo del brazo), el modo que se adecua a esta situación es el que le corresponde al NGTE (modelo1) por modo fricción, a pesar de que al elegir esta alternativa se obtendrá menor valor de corriente.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se puede observar que el prototipo no es capaz de entregar corriente por encima de  $86,2 \mu\text{A}$ , lo que representa un problema ya que esto se traduce en que el tiempo para almacenar una determinada carga eléctrica será prolongado, este resultado se debe a que los materiales utilizados no fueron tratados en laboratorios para aumentar su fricción con nanopartículas, como se expone en la sección 2.12 del capítulo II.

#### 4.1.3 Ensayos con todo el sistema conectado.

Con los resultados obtenidos del osciloscopio observado en las figuras 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21 del capítulo III, el voltaje máximo para cada capacitor obtenemos la carga ( $Q$ ) como se muestra en las Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 obtenidas con la siguiente ecuación  $Q = V \cdot C$  (C). Obteniendo para el modo de separación ambos modelos una carga máxima aproximadamente, para el modelo 1 de  $Q_1 = 170 \mu\text{C}$ , para un capacitor aproximado de  $C_1 = 45 \mu\text{F}$  y para el modelo 2 de  $Q_2 = 21 \mu\text{C}$ , para un capacitor de  $C_1 = 45 \mu\text{F}$ .

Para el modo de fricción de ambos modelos, el modelo 1 se obtuvo  $Q_1 = 124 \mu\text{C}$  a un  $C_1 = 40 \mu\text{F}$  y para el modelo 2  $Q_2 = 40 \mu\text{C}$  a un  $C_2 = 45 \mu\text{F}$ .

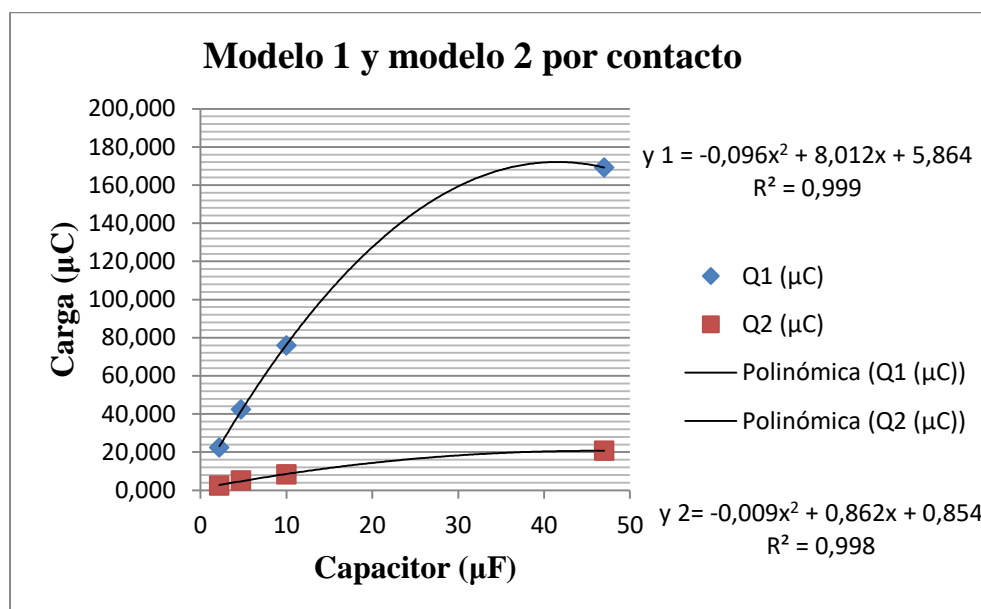


Figura 4.3. Carga, del modelo 1 y 2 por contacto.

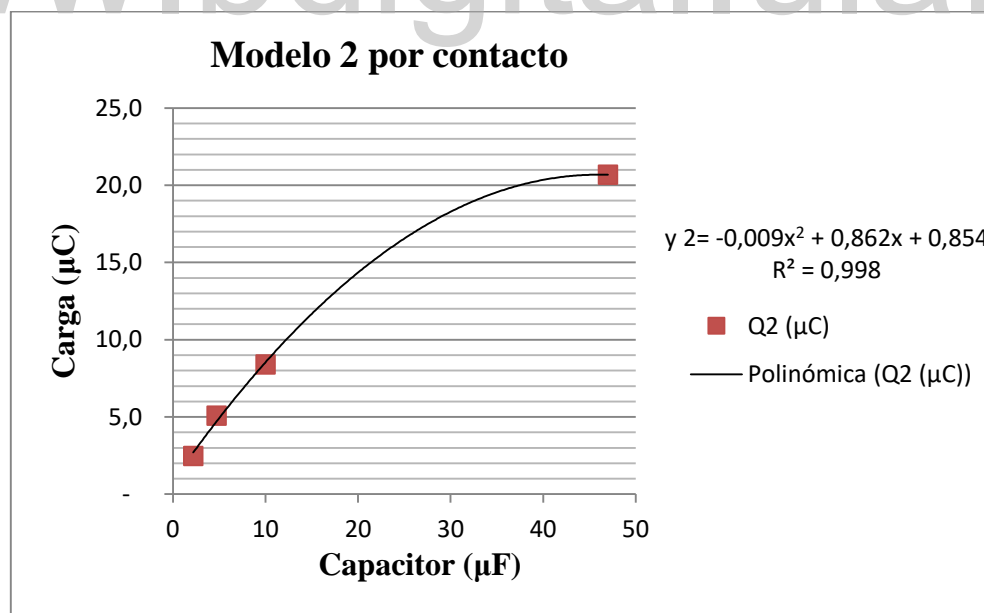
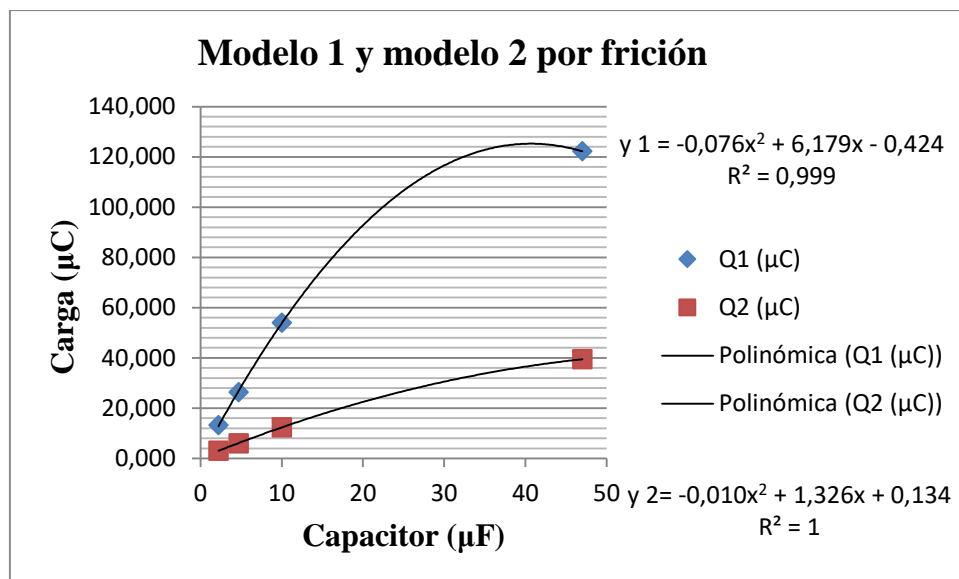
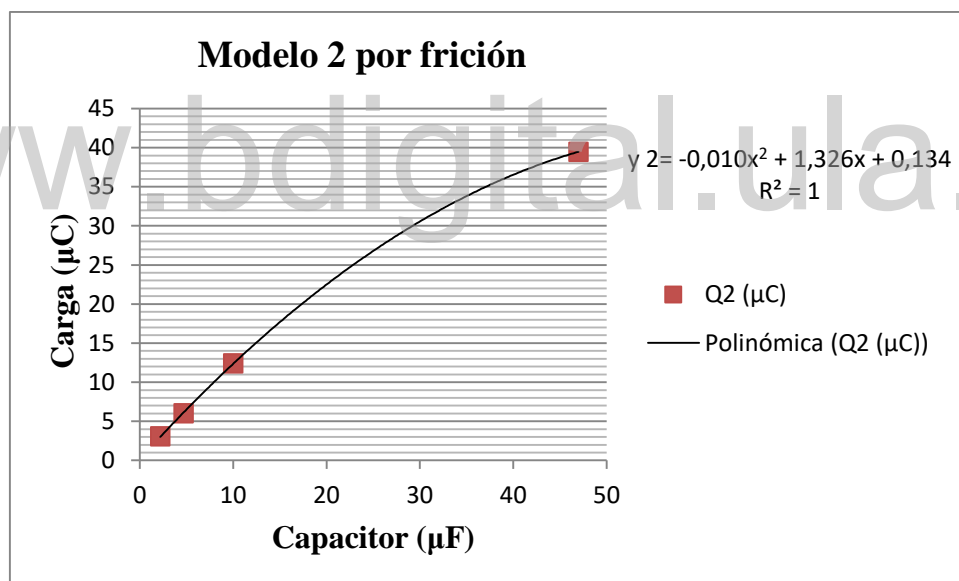


Figura 4.4. Carga, del modelo 2 por contacto.



**Figura 4.5. Carga, del modelo 1 y 2 por fricción.**



**Figura 4.6. Carga, del modelo 2 por fricción.**

En las Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se observa una gran diferencia en el rendimiento en lo que respecta a la carga almacenada. Comparativamente el modelo 1 almacena más carga que el modelo 2, confirmando el hecho teórico de que en el caso del NGTESE (modelo 2) el rendimiento es aproximadamente el 50% menor que en el caso del NGTE (modelo 1) y que, por lo tanto, la elección de utilizar el NGTE (modelo 1) es adecuada.

#### 4.1.4 Cálculo de la resistencia interna mediante capacitores.

Debido a que al intentar medir la resistencia interna del prototipo directamente se hace casi imposible, pues el multímetro no realiza ninguna lectura, se procedió a conectar directamente un capacitor a los bornes del prototipo, y mediante la ecuación de descarga de un capacitor, se calculó primero la resistencia interna del capacitor y luego se procedió a calcular la resistencia interna del prototipo.

Se utilizaron dos capacitores del mismo valor de  $4700 \mu\text{F}$ , C1 se cargó a 4 V y C2 se cargó a 3 V por medio de una fuente, con un multímetro se realizaron medidas de voltaje en los bornes de cada capacitor a dos minutos, luego cada 5 minutos y finalmente cada 10 minutos. Posteriormente se graficaron en Excel los valores obtenidos de voltaje y los tiempos, se ajustó la curva a una exponencial y con su ecuación respectiva obtenida, como se muestra en las Figuras 4.7 y 4.8 se igualó la expresión exponencial a la ecuación de descarga de un capacitor, obteniéndose que  $\frac{1}{RC} = 0,004$  sustituyendo el valor del capacitor y despejando, se encuentra que la resistencia interna del capacitor utilizado es  $R = 53,19 \text{ k}\Omega$

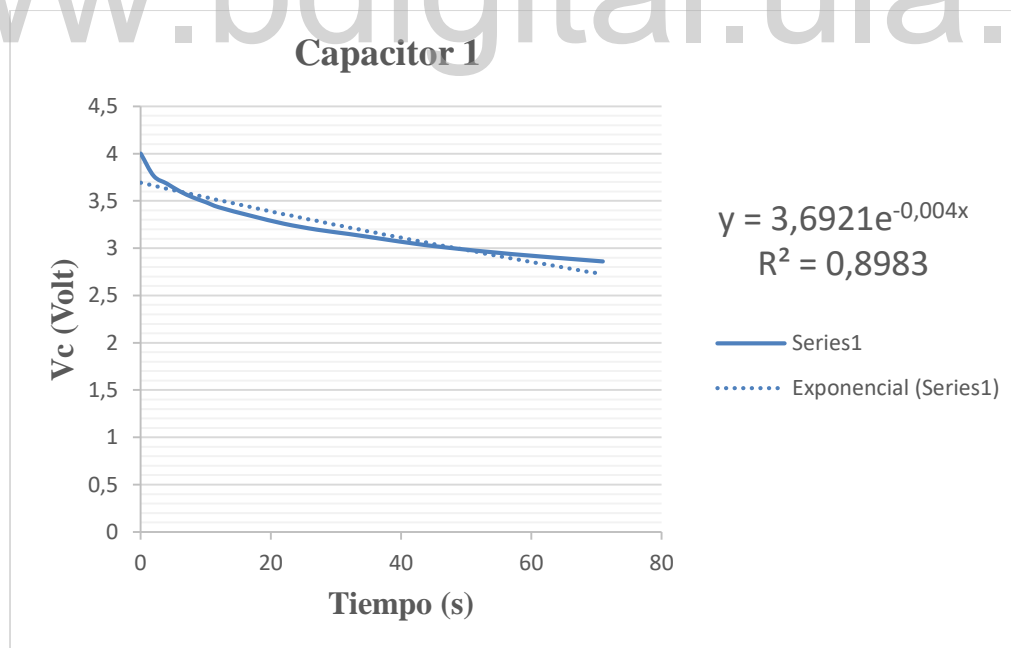
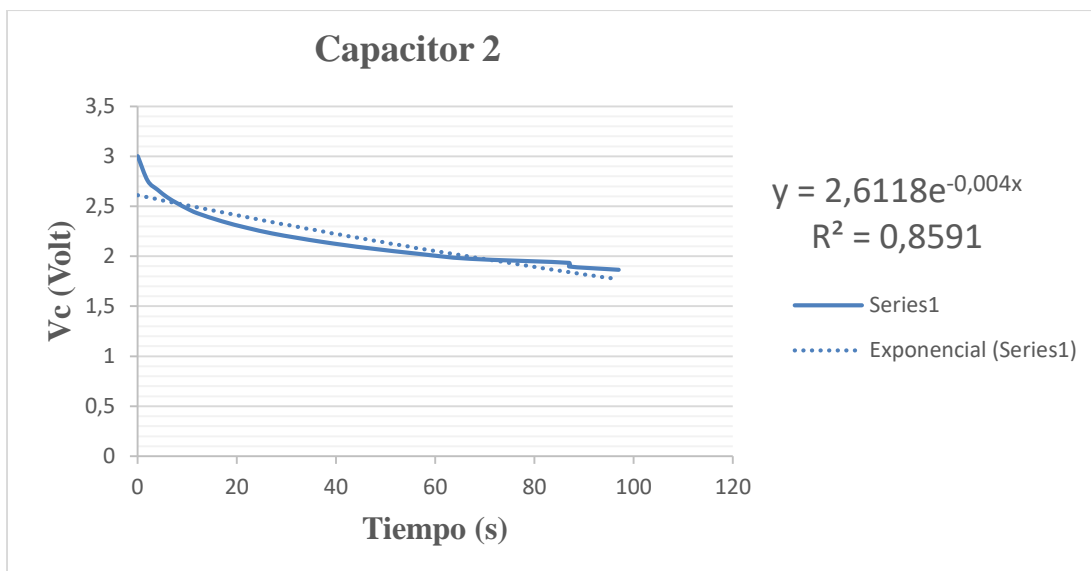


Figura 4.7. Descarga del capacitor 1



**Figura 4.8. Descarga del capacitor 2**

De los resultados obtenidos al ajustar las dos curvas de descarga de ambos capacitores, se llega a la conclusión de que el valor de la resistencia interna del capacitor hallado en ambos casos es la misma, y tiene un valor de  $R = 53,19 \text{ k}\Omega$ , tal como se esperaba debido a que son capacitores de igual magnitud,  $4700 \mu\text{F}$ .

Luego para calcular la resistencia interna del prototipo, se diseñó un circuito con el cual se pudiese observar sin complicación alguna, que el prototipo tiene la capacidad de capturar los electrones que se obtienen derivados del movimiento de fricción y entregarlos a un dispositivo de almacenaje de energía tan básico como un capacitor. Este capacitor se conecta de manera directa al prototipo NGTE para iniciar el proceso de carga, para este fin se utilizó un capacitor de  $4700 \mu\text{F}$ , con el propósito de almacenar la mayor carga posible y lograr encender un led a 10 segundos continuos, mediante fricción durante cierto tiempo como se muestra en la Tabla 4.1

Como se puede observar en la tabla 4.1, se realizó una sumatoria de los minutos en la que el NGTE se mantuvo en fricción y se obtuvo que el capacitor se cargó a  $2,3 \text{ V}$  aproximadamente en 6 horas.

**Tabla 4.1. Carga del capacitor 4700  $\mu\text{F}$** 

<b>Tiempo</b>	<b>Voltaje</b>
09:50am-09:53am (descanso de 3 minutos)	0,1 V
09:56am-10:13am (descanso de 5 minutos)	0,2 V
10:18am-10:42am (descanso de 1 minuto)	0,3 V
10:43am-11:23am (descanso de 13 minutos)	0,4 V
11:36am-11:55am (descanso de 30 minutos)	0,5 V
12:25pm-12:42pm (descanso de 2 minutos)	0,6 V
12:44pm-01:07pm (descanso de 1 minuto)	0,7 V
01:08pm-01:33pm (descanso de 1 minuto)	0,8 V
01:34pm-01:49pm (descanso de 1 minuto)	0,9 V
01:50pm-02:02pm (descanso de 2 minutos)	1,0 V
02:04pm-02:19pm (descanso de 1 minuto)	1,1 V
02:20pm-02:37pm (descanso de 1 minuto)	1,2 V
02:38pm-02:52pm (descanso de 9 minutos)	1,3 V
03:01pm-03:14pm (descanso de 2 minutos)	1,4 V
03:16pm-03:28pm (descanso de 1 minuto)	1,5 V
03:29pm-03:45pm (descanso de 1 minuto)	1,6 V
03:46pm-04:03pm (descanso de 1 minuto)	1,7 V
04:04pm-04:17pm	1,8 V
04:17pm-04:32pm (descanso de 1 minuto)	1,9 V
04:33pm-04:52pm (descanso de 2 minutos)	2,0 V
04:54pm-05:29pm (descanso de 36 minutos)	2,2 V
06:05pm-06:15pm	2,3 V

Luego para calcular la resistencia interna del prototipo, se midió con un multímetro a circuito abierto por fricción con el modelo 1 en 5 segundos se logró un voltaje de 10,2 V, se obtiene un circuito equivalente como se observa en la Figura 4.9

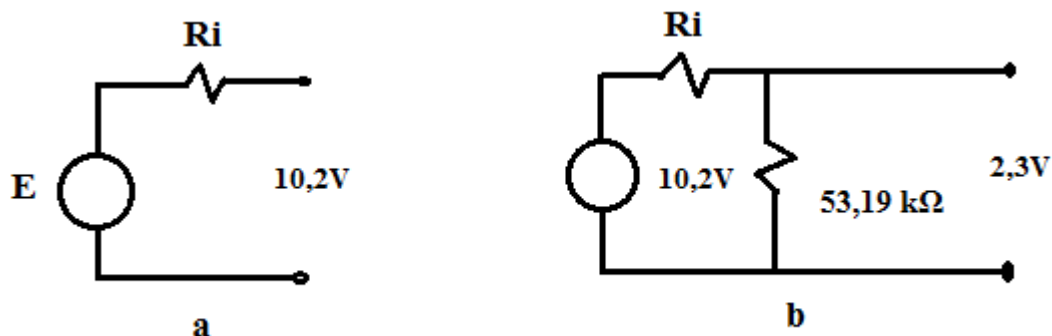


Figura 4.9. a) Voltaje a circuito abierto y b) Voltaje luego de muchas fricciones

Con todos esos datos obtenidos mediante un divisor de voltaje se obtiene el valor de  $R_i$   
 $10,2 V \times \frac{53k\Omega}{R_i+53k\Omega} = 2,3 V$  despejando  $R_i=182,89 k\Omega$ .

#### 4.1.5 Diseño de un circuito con fines demostrativos.

El diseño del prototipo total, del aprovechamiento del movimiento del cuerpo humano, se puede observar en la Figura 4.10. Consiste en el prototipo NGTE (modelo 1) está conectado a los bornes un capacitor de  $4700 \mu F$  para poder almacenar la mayor carga posible, en la misma línea pero separado por un swiche se diseñó otro circuito formado por una resistencia de  $1 k\Omega$  y un led, con el cual se pudiese observar la iluminación del led por un tiempo de 10 segundos aproximadamente

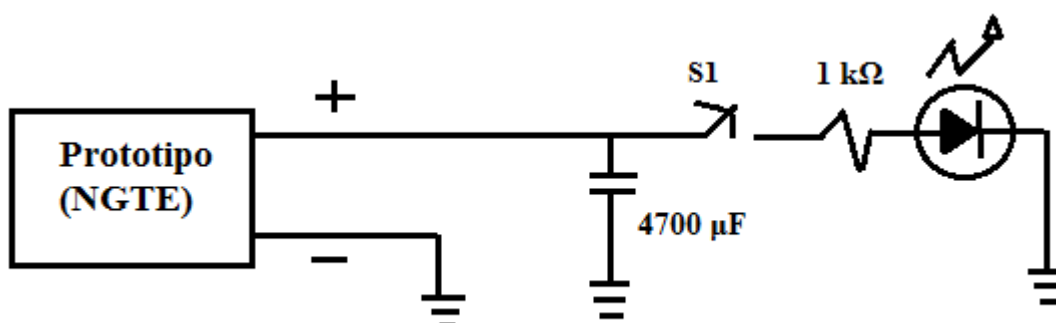
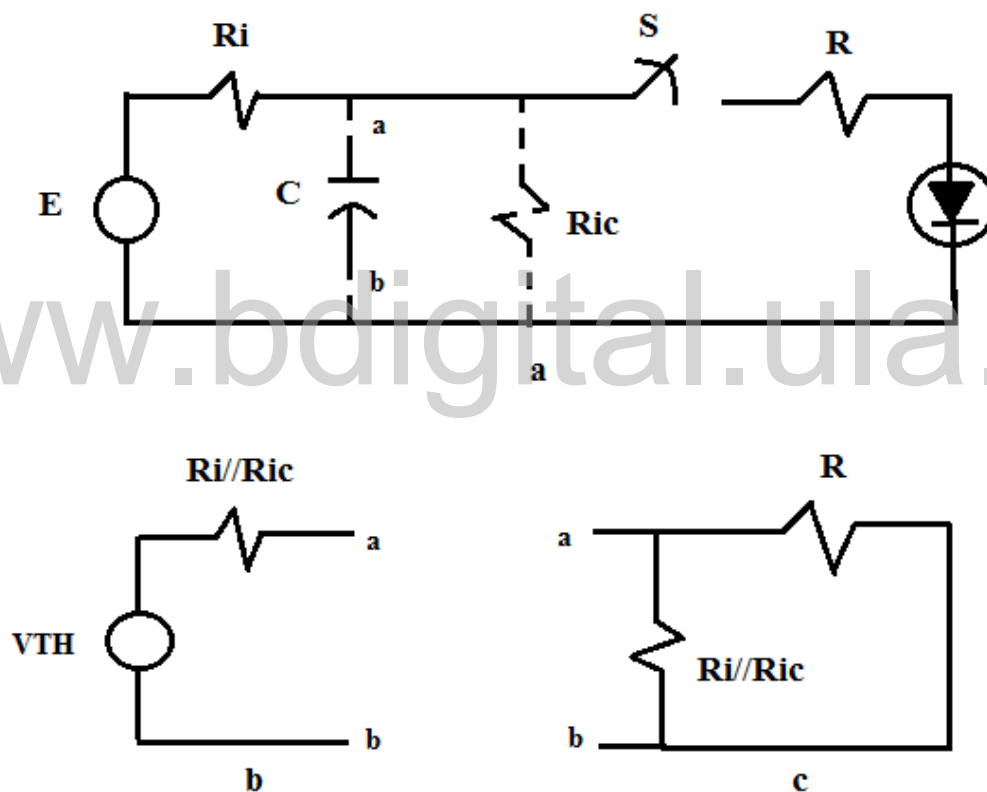


Figura 4.10. Esquema del circuito demostrativo

Una vez calculada la resistencia interna del prototipo se puede hallar el tiempo de carga del capacitor, realizando un Thevenin al circuito de la Figura 4.11a visto desde el capacitor sin

conectar la resistencia del  $1\text{k}\Omega$  y el led, se obtiene una  $R_{TH} = 182,89\text{ k}\Omega // 53,19\text{k}\Omega = 41,21\text{k}\Omega$ , con esta resistencia se puede calcular el tiempo de carga del capacitor utilizando la ecuación de carga de un capacitor se obtiene  $t_c = 16,14$  minutos

Luego realizando Thevenin visto desde el capacitor con la resistencia de  $1\text{k}\Omega$  y el led conectado, como se observa en la Figura 4.11c, se obtiene una  $R_{TH} = 41,21\text{ k}\Omega // 1\text{k}\Omega = 976,3\Omega$ , con esta resistencia se puede hallar el tiempo de descarga del capacitor utilizando la ecuación  $t_d = 22,9$  segundos



**Figura 4.11. a) Circuito equivalente, b) Circuito equivalente de Thevenin visto desde el capacitor para obtener el tiempo de carga del capacitor y c) Circuito equivalente de Thevenin visto desde el capacitor para obtener el tiempo de descarga del capacitor.**

Donde en dichas pruebas realizadas en el laboratorio Profesor Francisco Vilorio y con ayuda del Profesor Francisco Vilorio y Profesor Antonio Pérez se logra capturar y encender el LED

## CONCLUSIONES

En los tiempos actuales, donde el cuidado del medio ambiente unido a la demanda creciente de energía eléctrica obliga a la búsqueda de alternativas de generación auto-sostenible y eficiente, el desarrollo de sistemas recolectores de energía que aprovechan el movimiento humano, como lo es el prototipo propuesto, constituye una apuesta válida desde la perspectiva de cubrir una demanda específica y a pequeña escala.

Los resultados obtenidos prueban que este propósito es viable, con el diseño y construcción de un recolector que funcione con un nanogenerador Modelo 1 (dielectrico-dielectico, electrodo adjunto) operando en fricción debido a que este presenta un mejor desempeño tanto en el voltaje como en la corriente que es capaz de suministrar, en comparación con el Modelo 2 (simple electrodo) operando igual (fricción). Los resultados muestran que el Modelo 2 se satura rápidamente a un menor voltaje, debido principalmente a su particular configuración, la cual al tener intercalado un electrodo primario de aluminio, este produce un efecto de pantalla electrostática que limita el crecimiento del voltaje y hace que su rendimiento sea menor en casi 50% que en el modelo seleccionado.

En relación al proceso de carga del elemento almacenador (capacitor), al comparar el tiempo teórico (16,14 minutos) para el voltaje de saturación (2,3 V) con el tiempo real (360 minutos) se puede verificar una discrepancia significativa, debido fundamentalmente a que el proceso de carga se realizó por intervalos de tiempo y que al reanudar el proceso, de un tramo a otro, el capacitor se haya descargado parcialmente, con la subsecuente prolongación del tiempo de carga.

Cabe resaltar que, para la concreción del presente proyecto, se emplearon materiales reciclables de bajo costo, lo que permite producir energía eléctrica de manera rentable, más si

se quiere mejorar el desempeño de estos dispositivos habrá que utilizar materiales tratados para este fin específico, tal como se refleja la literatura de las recientes investigaciones en el campo de la nanotecnología.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## RECOMENDACIONES

La realización de este trabajo significa un esfuerzo positivo en lo que respecta a la aplicación del conocimiento de la ingeniería eléctrica en la creación de novedosas alternativas no contaminante, y que se recomienda considerarlo como referencia para futuros trabajos que se orienten en esa dirección.

Además, la no disponibilidad de fuentes de información confiable en idioma español no fue impedimento para abordar el análisis teórico del presente trabajo, más si ocasionó una dilatación del tiempo requerido para su elaboración, al tener que acceder a documentos y libros en idioma inglés con investigaciones muy recientes y por tanto restringidas, en el campo de la tecnología de los recolectores de energía, para lo cual se sugiere que la institución universitaria facilite, a través de las bibliotecas, el acceso a esta documentación.

Por otro lado, se propone también construir prototipos basados en otros modelos disponibles y probados de recientes investigaciones y que proporciona un mayor nivel de energía eléctrica generada.

Para lograr resultados óptimos en las futuras propuestas de desarrollo de sistemas recolectores de energía se sugiere considerar la realización de las pruebas en condiciones controladas de laboratorio ya que tanto la humedad, la polución y otros factores ambientales pueden influir considerablemente.

## REFERENCIAS

- [1] J. Schallenberg, G. Piernavieja, C. Rodríguez, P. Unamunzaga, R. García, M. Díaz, D. Cabrera, G. Martel, J. Pardilla y V. Subiela, *Energías renovables y eficiencia energética*. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias, 2008.
- [2] M. González, “Cargas y Campo eléctrico”, *Electricidad y Magnetismo*, Venezuela: 1992, pp. 1-2.
- [3] R. García "Estudio del comportamiento de materiales textiles en relación con la electricidad estática". Tesis doctoral, Universidad de salamanca, Béjar, 2014.
- [4] J. F Gonzalez “*Desarrollo de una máquina de descargas electrostática para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería*”, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2015.
- [5] M. González, “Cargas y Campo eléctrico”, *Electricidad y Magnetismo*, Venezuela: 1992, pp. 5-9.
- [6] M. González, “Cargas y Campo eléctrico”, *Electricidad y Magnetismo*, Venezuela: 1992, pp. 10-14.
- [7] M. González, “Cargas y Campo eléctrico”, *Electricidad y Magnetismo*, Venezuela: 1992, pp. 14-16.
- [8] J. Henniker, Triboelectricity in polymers. *Nature* 196(474) (1962).
- [9] D. Davies, Charge generation on dielectric surfaces. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2(11), 1533 (1969).
- [10] A. Erturk y D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.
- [11] M. T. Penella y M. Gasulla, «A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors», en *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007*, 2007, pp. 1-5.
- [12] E.S. Orozco “*Diseño de un colector de energía piezoeléctrico*”, Universidad nacional de colombia, Colombia, 2014
- [13] Enlight (2017, mayo, 02) Sistemas de energía solar paneles solares [Online] Available: [https://www.enlight.mx/blog/celdas-fotovoltaicas-basicos%3fhs\\_amp=true](https://www.enlight.mx/blog/celdas-fotovoltaicas-basicos%3fhs_amp=true)

- [14] C. D. Lazaro, “*Obtención de energía eléctrica por medio de piroelectricidad*”, Instituto politécnico nacional, México, 2016
- [15] S. Gerhard (2014, noviembre, 26) Elemento termoelectrico [Online] Available: <https://patentados.com/2014/elemento>
- [16] J. A. Brito “*DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA CAPTURA DE ELECTRONES QUE SE PRODUCEN EN EL PROCESO DE LA FOTOSÍNTESIS PARAGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA*”, Universidad de los andes, Venezuela, 2019
- [17] M. González, “Cargas y Campo eléctrico”, *Electricidad y Magnetismo*, Venezuela: 1992, pp. 25-27.
- [18] H. Baytekin, A. Patashinski, M. Branicki, B. Baytekin, S. Soh, B.A. Grzybowski, The mosaic of surface charge in contact electrification. *Science* 333(6040), 308–312 (2011).
- [19] M. Alvarez (2020, Enero, 10) MOOTOLS.NET [Online] Available: <http://mootols.net/que-son-los-nanogeneradores-y-para-que-funcionan/>
- [20] Agrawal. R, Peng. B, Nanolett 2009, 9, 4177-4183
- [21] Katherine Bourzac (2009, abril, 09) Cambioclímático[Online] Available: <https://www.technologyreview.es/s/381/un-recolector-hibrido-de-nano-energia#:~:text=Este%20dispositivo%20es%20capaz%20de%20capturar%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20y%20la%20mec%C3%A1nica.&text=Los%20nanogeneradores%20pueden%20transformar%20la,en%20una%20fuente%20de%20energ%C3%ADa.>
- [22] Gregory Kopiev (2017, Junio, 06) Tecnología [Online] Available: <https://nmas1.org/news/2017/06/07/triboelectricidad>
- [23] Z.L. Wang, J. Chen, L. Lin, Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy Environ. Sci.* 8(8), 2250–2282 (2015).
- [24] G. Zhu, C.F. Pan, W.X. Guo, C.Y. Chen, Y.S. Zhou, R.M. Yu, Z.L. Wang, Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning. *Nano Lett.* 12(9), 4960–4965 (2012).
- [25] S.H. Wang, L. Lin, Z.L. Wang, Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics. *Nano Lett.* 12(12), 6339–6346 (2012).
- [26] Y. Yang, Y.S. Zhou, H.L. Zhang, Y. Liu, S.M. Lee, Z.L. Wang, A single-electrode based triboelectric nanogenerator as self-powered tracking system. *Adv. Mater.* 25(45), 6594–6601 (2013)
- [27] S.H. Wang, Y.N. Xie, S.M. Niu, L. Lin, Z.L. Wang, Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes. *Adv. Mater.* 26(18), 2818–2824 (2014)

- [28] Z.L. Wang, L. Lin, "Triboelectric Nanogenerator: Single-Electrode Mode", *Triboelectric Nanogenerators*, USA: 2012, pp. 121-125.
- [29] J. Henniker, Triboelectricity in Polymers. *Nature* 196(4853), 474 (1962).
- [30] A.F. Diaz, R.M. Felix-Navarro, A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties. *J. Electrostat.* 62(4), 277–290 (2004)
- [31] W. H. Hayt y J. Buck, *Teoría Electromagnetica*. 7ª ed., México, McGraw-Hill, 2006, pp 114-167.
- [32] R. A. Serway y J. W. Jewett, *FÍSICA para ciencias e ingeniería con Física Moderna*. 7ª ed., vol 2, Mexico, CENGAGE Learning, 2009, pp 722-744
- [33] D. Andrés Emiro "Oportunidades para la implementación de ultracapacitores en aplicaciones del sector eléctrico colombiano", Colombia, 2016
- [34] J. Chun, J.W. Kim, W.S. Jung, C.Y. Kang, S.W. Kim, Z.L. Wang, J.M. Baik, Mesoporous pores impregnated with Au nanoparticles as effective dielectrics for enhancing triboelectric nanogenerator performance in harsh environments. *Energy Environ. Sci.* 8(10), 3006–3012 (2015).
- [35] Esquivel Arteaga Jaqueline (2010), Electroscopio. <http://electroscopi0.blogspot.com/>.
- [36] Yang, B.; Yun, K.S. Piezoelectric shell structures as wearable energy harvesters for effective power generation at low-frequency movement. *Sens. Actuators A Phys.* 2012, 188, 427–433.