

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS**



TESIS

**“ESTUDIO DE LAS CAPACIDADES TRIBOELÉCTRICAS
DE PELÍCULAS DE SILICONAS DE DRAGÓN SKIN Y
ECOFLEX MEDIANTE UN DISPOSITIVO DE
CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DESARROLLADO
LOCALMENTE”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO
EN CIENCIAS EN FÍSICA**

**ELABORADO POR
JUAN MANUEL ZUÑIGA MAMANI**

**ASESORA
DRA. MARÍA ESTHER QUINTANA CÁCEDA**

**LIMA-PERÚ
2024**

Este trabajo es dedicado a:
Mis padres, Teodora y Claudio, por su apoyo desde siempre. A mis hermanos, Roger, Mirka, Vanessa y Greta quienes han sido mi soporte emocional; a mis sobrinos Royer, Zahory e Iker por sus ocurrencias que alegran el día; y a Nila, por su compañía y apoyo en días claros y grises.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora, la Dra. María Quintana por su apoyo, guía y paciencia durante todo el desarrollo de mi tesis.

A la Universidad Peruana Cayetano Heredia, por permitirme usar sus ambientes para el desarrollo experimental de mi tesis.

A grandes compañeros, como Miguel, Harry y Pierre por su apoyo y consejos para mejorar mi tesis.

RESUMEN

En estos últimos años los dispositivos de monitoreo inalámbricos o “wearables” se vienen desarrollando cada vez más dentro del campo de las tecnologías IoT (internet de las cosas). Frente a ello surge la necesidad de buscar fuentes de energía para estos dispositivos IoT. Una tecnología reciente, de alrededor de los 10 años, viene emergiendo, estos son los nanogeneradores triboeléctricos, los cuales, tienen el potencial de ser fuente de energía e incluso en muchos casos funcionan como sensores. Para contribuir al desarrollo de este campo se diseñó y fabricó un dispositivo portátil que nos permita caracterizar eléctricamente nanogeneradores triboeléctricos, luego desarrollamos películas de dos tipos de siliconas, Ecoflex 0030 y Dragon Skin 0030, como materiales negativos (que recibe electrones) y papel de aluminio como un material ligeramente positivo (que cede electrones). Tanto el Dragon Skin como el Ecoflex son elastómeros muy usados en estudios y desarrollos biomecánicos, prótesis y exoesqueletos. En el presente trabajo diseñamos y fabricamos un equipo para estudiar la salida de voltaje de TENGs por el mecanismo de contacto directo. Con este equipo estudiamos la influencia de la variación del espesor de las películas y la frecuencia de contacto en la respuesta de voltaje en circuito abierto. También estudiamos la influencia del área de contacto en la salida de voltaje. Además, complementaremos los resultados de caracterización eléctrica con estudios de AFM y DRX. Luego usamos cálculos analíticos para explorar el comportamiento triboeléctrico del Ecoflex 0030 variando su espesor. El software de versión libre para resolver las ecuaciones analíticas será Octave, el cual es una versión libre de Matlab. Luego, comparamos los resultados analíticos con los experimentales. Por último, es preciso mencionar que estos elastómeros son muy usados en la ingeniería biomédica y estudiar su comportamiento triboeléctrico puede dar pie a futuras aplicaciones en el campo de los sensores de presión o los nanogeneradores para alimentar dispositivos de monitoreo.

CONTENIDO

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
CAPITULO II. MARCO TEORICO.....	4
2.1. Triboelectrificación.....	4
2.2. Nano Generadores Triboeléctricos	12
2.2.1. Tipos de Nanogeneradores Triboeléctricos.....	16
2.3. Parámetros que influyen en el rendimiento de un TENG.....	18
2.3.1. Espesor de capa	19
2.3.2. Superficie	21
2.3.3. Frecuencia de contacto.....	25
2.3.4. Fuerza de contacto.....	27
2.4. Técnicas de caracterización	29
2.4.1. Microscopía de fuerza atómica.....	29
2.4.2. Difracción de rayos X	30
2.5. Modelamiento de un TENG como un capacitor	30
CAPITULO III. METODOLOGÍA	32
3.1. Diseño y fabricación de un sistema de caracterización TENGs	33
3.2. Desarrollo de películas del elastómero Ecoflex 030 y Dragon Skin 030	34
3.3. Caracterización eléctrica de las películas y superficies de Silicona Ecoflex.....	36
3.4. Caracterización morfológica de las películas de Dragon Skin	38
3.5. Modelo analítico para nanogeneradores triboeléctricos	39
CAPITULO IV. DESARROLLO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN ...	43
4.1. Dispositivo de caracterización TENGs.....	43
4.2. Películas y superficies de Silicona Ecoflex.....	45
4.3. Caracterización eléctrica de las películas de Silicona Ecoflex y Dragon Skin	49
4.3.1. Caracterización eléctrica del Ecoflex.....	50
4.3.2. Caracterización eléctrica del Dragón Skin.....	53
4.3.3. Influencia del área en la salida de voltaje.....	56
4.4. Caracterización de las películas de Ecoflex y Dragon Skin.....	57
4.5. Resultados analíticos de nanogeneradores triboeléctricos	60
CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS.....	67
ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto triboeléctrico. La línea roja discontinua indica la ruta del efecto triboeléctrico.....	4
Figura 2. Ilustración de la función trabajo y la afinidad electrónica.	5
Figura 3. La deformación de la red y la vibración cambian cuando se ejerce un movimiento relativo y dos superficies se compactan juntas. (a) Modo de vibración de la red en equilibrio de una superficie sin fricción. (b) Modo de vibración de la red inducida por la fricción de una superficie cuando se ejerce fricción.....	6
Figura 4. Representación de la distribución de la red para modos de vibración perturbados y no perturbados.	7
Figura 5. Ilustración de la distribución de carga del electrón sobre las superficies de fricción. Las cargas azules demuestran la transferencia de los electrones tribo-inducidos y su correspondiente carga; las cargas negras representan las cargas inducidas que no pueden cruzar la interfaz.	9
Figura 6. Medida del potencial superficial como una función del tiempo para par látex-PTFE. Las medidas fueron tomadas cerca de la superficie del látex. (a) Sin deformación, (b) Con deformación del látex de $\epsilon = 140\%$. Las líneas rojas indican la información del cálculo teórico y la línea azul indica el ajuste para los modos extendidos.	10
Figura 7. (a) Potencial superficial medido en función del tiempo cerca de la superficie de látex usando como material par al PU. (b) Estructura del PU y PTFE.....	11
Figura 8. Medida de la superficie potencial como una función del tiempo para un par de contacto de acero inoxidable y látex sin deformar.	12
Figura 9. Representación gráfica de dos placas cargadas producto del efecto triboeléctrico.	14
Figura 10. Los 4 principales modos de trabajo de un Nanogenerator triboeléctrico. a) Modo de separación de contacto vertical. b) Modo de deslizamiento lateral. c) Modo de electrodo único. d) Modo de desplazamiento libre.	17
Figura 11. La corriente de desplazamiento, fundamentos e impactos.	19
Figura 12. Influencia de la variación del espesor de capa del dieléctrico en la salida del voltaje para un TENG basado en almidón de papa.	20
Figura 13. Influencia de la variación del espesor de capa del dieléctrico en la salida del voltaje para un TENG basado en PDMS.	21
Figura 14. Nanogenerador triboeléctrico basado en micro varillas.....	22

Figura 15. Nanogenerador triboeléctrico basado en PTFE y aluminio con superficie plana y patrones de papel lija de #800, #1000 y #1200.	23
Figura 16. Nanogenerador triboeléctrico basado en óxido de indio y estaño como electrodos y PDMS con diferentes patrones morfológicos superficiales como dieléctrico.	24
Figura 17. Variación de voltaje de Nanogenerador triboeléctrico basado en óxido de indio y estaño como electrodos y PDMS con diferentes patrones morfológicos superficiales como dieléctrico.	24
Figura 18. Variación de voltaje de salida con respecto a la variación de frecuencia para una TENGs basado en fluoroelastómero y electrodos de grafeno.	25
Figura 19. Variación de voltaje de salida con respecto a la variación de frecuencia para una TENGs basado en almidón de papa y electrodos de aluminio.	26
Figura 20. Variación de voltaje de salida con respecto a la fuerza aplicada para una TENGs basado en politetrafluoroetileno y electrodos de aluminio.	27
Figura 21. Variación de voltaje de salida con respecto a la fuerza aplicada para una TENGs basado en almidón de papa y aluminio.	28
Figura 22. Esquema de operación de un microscopio de fuerza atómica (modo estático) ..	30
Figura 23.. Pasos que muestran el principio de funcionamiento de un TENG en condición de circuito abierto.	31
Figura 24. Despiece de los elementos que componen el sistema de caracterización TENGs.	34
Figura 25. Proceso de formación de las películas de silicona.	35
Figura 26. Modelado de los patrones de poros generados para las películas.	35
Figura 27. Colocación de los filmes.	36
Figura 28. Led indicador que el sistema está energizado.	37
Figura 29. Colocación de sondas de osciloscopio.	37
Figura 30. Encendido general.	38
Figura 31. Equipo AFM marca NT-MDT, modelo NTEGRA II (izquierda). Difractómetro de la marca Bruker D8 Advance(derecha).	39
Figura 32. Ilustración esquemática de un sistema de coordenadas para un modo de Nanogenerador triboeléctrico en modo de separación por contacto.	39
Figura 33. Modelado 3D del equipo TENGs.	44
Figura 34. Equipo TENGs fabricado.	44

Figura 35. Medición de películas de 900 micras para película de Ecoflex 0030.	47
Figura 36. Proceso de fabricación de las películas con agujeros. a) Modelo impreso en 3D, b) Dragon skin sobre el molde de silicona, c) Silicona solidificado con los patrones de agujeros de diferentes diámetros.	48
Figura 37. Variación de Voltaje (Voltios) para cada espesor de película (en micras) de Ecoflex para frecuencias de f_1 , f_2 y f_3	51
Figura 38. Variación de la fuerza de contacto al variar el espesor de la película del Ecoflex-0030.	52
Figura 39. Variación de Voltaje para cada espesor de películas de Dragon Skin para frecuencias de f_1 , f_2 y f_3	54
Figura 40. Variación de la fuerza de contacto al variar el espesor de películas del Dragon skin.....	54
Figura 41. Variación de Voltaje para cada diámetro de agujero para películas de Dragon Skin para frecuencias de f_1 , f_2 y f_3	56
Figura 42. Resultados AFM para películas de Dragon Skin(a) y Ecoflex(b).....	58
Figura 43. Resultados de DXR para film de Ecoflex(a) y Dragon Skin(b).....	59
Figura 44. Variación de voltaje para espesores de dieléctrico (Ecoflex).	63
Figura 45. Variación de voltaje con respecto a la distancia de separación entre el electrodo y el dieléctrico.	63
Figura 46. Variación de voltaje con respecto al espesor del dieléctrico experimental y computacionalmente para las frecuencias 1(a), 2(b),3(c).....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Posible densidad de carga después de la transferencia electrónica para algunos materiales.....	8
Tabla 2. Serie Triboeléctrica.	15
Tabla 3. Análisis AFM de valores Rrms, áreas de superficie y ángulos de contacto de PTFE tratado con varias condiciones de plasma.	29
Tabla 4. Espesores de películas de Silicona-Ecoflex..	45
Tabla 5. Espesores de películas de Silicona-Dragon Skin.....	46
Tabla 6. Films de entre 1 a 2 mm de espesor con diferentes porosidades.....	49
Tabla 7. Voltajes de salida(V) para cada espesor de las películas de Ecoflex variando la frecuencia y registrando la fuerza de contacto en Newton.....	50
Tabla 8. Voltajes de salida(V) para cada espesor de películas de Dragon Skin variando la frecuencia y registrando la fuerza de contacto en Newton.....	53
Tabla 9. Voltaje de salida para cada diámetro de la porosidad de películas de Dragon Skin para un espesor de entre 1.25 a 1.54 micras.....	56
Tabla 10. Análisis de AFM de valores de Rrms.....	57
Tabla 11. Dimensiones de las capas que conforman el TENG propuesto.....	60
Tabla 12. Parámetros adicionales para el modelamiento del TENG en modo contacto simple propuesto.	61
Tabla 13. Propiedades de los materiales.....	61
Tabla 14. Comparativa de resultados de voltaje con respecto al espesor del Ecoflex.	62

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

El consumo de energía a nivel mundial y los problemas medioambientales han cobrado gran interés en las recientes décadas. Por tal motivo surge la necesidad de generar energía limpia ((Olabi & Abdelkareem, 2022); (Ahmadi, y otros, 2018)). Es en estos escenarios donde surgen los nanogeneradores triboeléctricos (TENGs), los cuales han ganado creciente atención como un medio para generar energía del movimiento mecánico del medio ambiente como vibraciones, el movimiento humano, etc. ((Wang, Shi, & Lee, 2022); (Rahimi Sardo, y otros, 2022); (Lone, y otros, 2022); (Pang, y otros, 2023)). El mecanismo de un TENG está basado en una combinación de electrificación por contacto e inducción electrostática, este primero ocurre cuando dos materiales diferentes entran en contacto ((Wang, Liu, Ye, Li, & Wang, 2021); (Ren, Wu, Pang, Zhang, & Yang, 2022)). Dos materiales de diferente capacidad triboeléctrica, los cuales tienen la capacidad para ceder o ganar electrones, son la principal razón del funcionamiento de un TENGs (Lyu & Wang, 2022). Como resultado del movimiento de electrones, luego del contacto, se produce una diferencia de potencial entre ambas caras la cual se incrementa mientras ambas superficies se van separando. Esta diferencia de potencial es el principio de la conversión de energía mecánica a eléctrica. Existen factores que intervienen en la capacidad de un TENGs, uno de ellos es la elección de un par de materiales que originen una alta densidad de carga superficial (Duque & Murillo, 2022), otro parámetro es el incremento de la rugosidad en la superficie (Wen, y otros, 2022). Existen diferentes métodos de fabricación para modificar la rugosidad de una superficie. Métodos como el de litografía fue usado para crear una especie de barras en la superficie de un poly (1H,1H,2H,2H-perfluorodecyl methacrylate) (PFDMA) fluoropolymer (Ha, y otros, 2017). Otro trabajo donde modificaron la superficie estructural se realizó con mallas de metal de diferentes números y Polydimethylsiloxane (PMDS), esto con el objetivo de formar patrones reticulares superficiales (Zhong, y otros, 2023). Existen trabajos en los que usaron lija de diferentes grados para fabricar las microestructuras sobre polytetrafluoroethylene (PTFE) como material que gana electrones y el aluminio como el material que cede electrones (Mule, Dudem, & Yu, 2018). En general, existen publicaciones donde han estudiado la influencia de diferentes parámetros sobre la salida de voltaje, los cuales involucran materiales, equipos, instrumentos de medición, etc. Por otro lado, algunos optan por usar el cálculo numérico, el cual con la ayuda del software viene a ser económico comparado con los experimentos.

En este trabajo diseñamos y fabricamos un dispositivo de caracterización eléctrica para nanogeneradores triboeléctricos. Luego desarrollamos un análisis de las capacidades triboeléctricas de dos películas de siliconas de Ecoflex y Dragon Skin, como materiales negativos (que recibe electrones) y papel de aluminio como un material ligeramente positivo (que cede electrones). Estudiamos la influencia de la variación del espesor de películas y la frecuencia de contacto en la respuesta de voltaje en circuito abierto. También estudiamos la influencia del área de contacto en la salida de voltaje. Además, realizamos cálculos analíticos, los cuales nos dan la posibilidad de comparar la respuesta de un TENG de modo de contacto-separación al variar el espesor con los datos experimentales recogidos.

Finalmente, el nanogenerador triboeléctrico desarrollado funciona por el mecanismo de contacto directo. Tanto el Dragon Skin como el Ecoflex son elastómeros muy usados en estudios y desarrollos biomecánicos, prótesis y exoesqueletos. Sin embargo, su uso como sensor aún no está muy desarrollado. Razón por la cual se pretende estudiar su capacidad de rendimiento variando parámetros como espesor de películas y frecuencia de contacto midiendo la fuerza de contacto en todo momento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar experimentalmente las propiedades triboeléctricas del Ecoflex y el Dragón Skin mediante un equipo desarrollado localmente.

1.2.2. Objetivos específicos

Estudiar experimentalmente las propiedades triboeléctricas del Ecoflex y el Dragón Skin mediante un equipo desarrollado localmente.

- Diseñar y fabricar un dispositivo de caracterización de TENGs.
- Desarrollar películas de siliconas de Ecoflex y Dragón Skin de diferentes espesores.

- Caracterizar películas de siliconas de Ecoflex y Dragón Skin de diferentes espesores variando la frecuencia de contacto y variando la superficie de contacto.
- Comparar los resultados experimentales de la influencia del espesor de la película en la salida de voltaje para el Ecoflex con cálculos analíticos.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1. Triboelectrificación

El efecto de la triboelectrificación es interesante pero complejo debido a los múltiples factores que se pueden desarrollar en un mismo proceso triboeléctrico, el cual sumado a un complejo análisis para desacoplar en análisis de cada parámetro dominante para el modelado del efecto triboeléctrico. Aún las leyes de la física son insuficientes para entender este proceso a pesar de haber trabajos de simulaciones y modelamientos usados para tratar de explicar el fenómeno.

La triboelectrificación es un campo que involucra fenómenos interraciales mecánicos, termodinámicos y electromagnéticos. Una teoría que trata de explicar el fenómeno de triboelectrificación por contacto entre sólidos es a través de la transferencia de electrones.

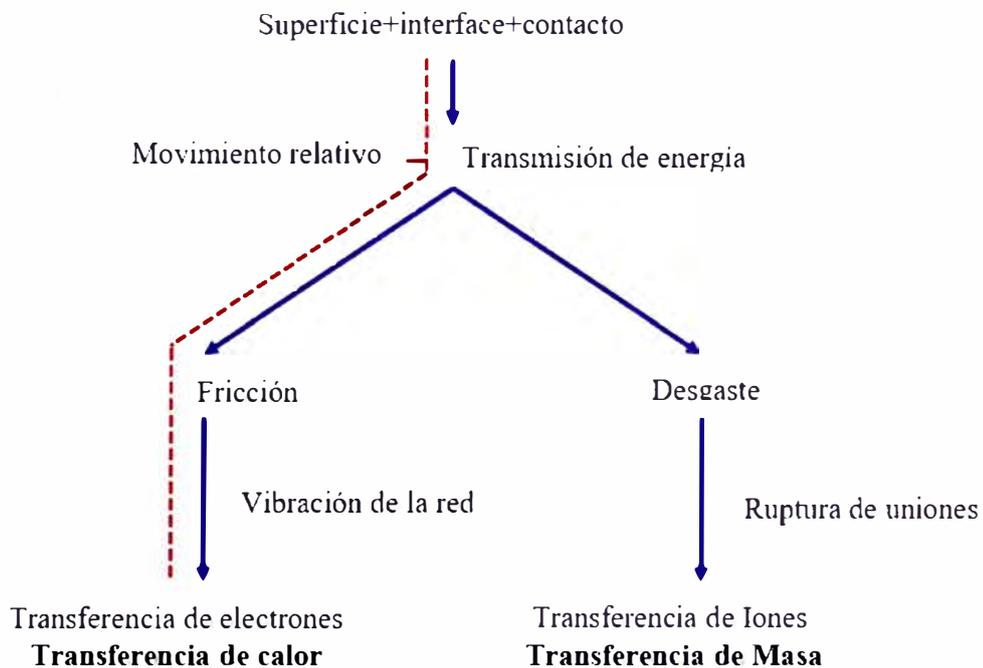


Figura 1. Efecto triboeléctrico. La línea roja discontinua indica la ruta del efecto triboeléctrico. (Pan & Zhang, Triboelectric effect: A new perspective on electron transfer process, 2017).

Para intentar analizar teóricamente el efecto triboeléctrico, tenemos que introducir el término Función trabajo $W_{superficial}$, el cual describe el mínimo trabajo termodinámico(energía) necesario para remover un electrón del sólido hacia un punto en el vacío "inmediatamente" fuera de la superficie del sólido, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$W_{superficie} = -e \cdot \Phi - E_{valencia}(\epsilon_F) \quad (1)$$

Donde ϵ_F indica el nivel de fermi del electrón en sólidos y $E_{valencia}$ es la energía de la banda de valencia, Φ es el potencial electrostático equivalente en el vacío cerca de la superficie y $-e$ es la carga negativa del electrón.

La afinidad electrónica, X , es la energía obtenida luego de mover un electrón desde el vacío (justo en la superficie del material) hacia la parte superior de la banda de conducción (para dieléctricos) o nivel de fermi (para metales) justo dentro de la superficie.

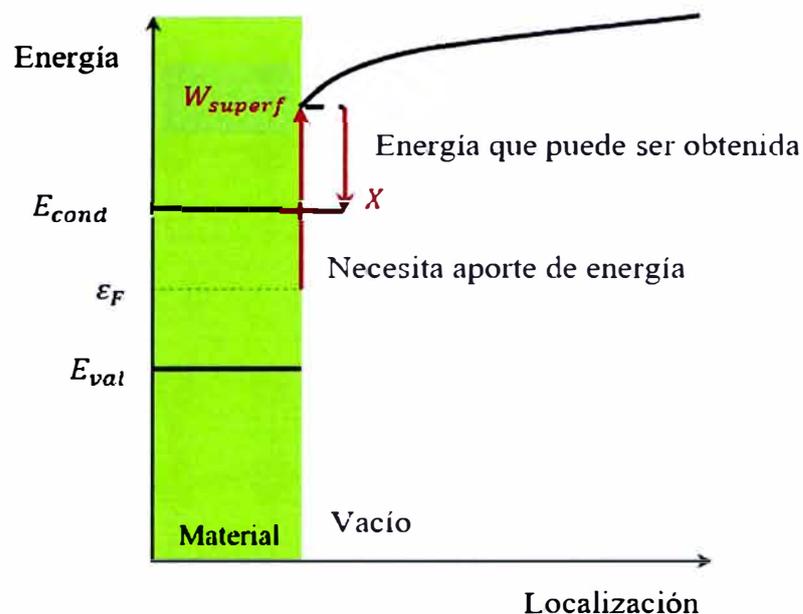


Figura 2. Ilustración de la función trabajo y la afinidad electrónica.

$$X = E_{vacio} - E_{conducción}(\epsilon_F) \quad (2)$$

Donde $E_{conducción}(\epsilon_F)$ es la característica de los materiales sólidos, y $E_{vacío}$ y $E_{conducción}$ son la energía en el vacío y energía de la banda de conducción, respectivamente.

Generalmente los materiales que transfieren electrones desde su superficie son llamados “donador”, mientras que la superficie a donde los electrones son transferidas es llamada “aceptador”, y generalmente no es un metal. La interfaz puede ser considerada como vacío ya que generalmente la interfaz suele ser aire.

El proceso triboeléctrico está dividido en dos etapas: el inicio de la generación de la carga (desde el estado sin carga hasta el inicio de la carga) y la distribución estable de la carga (después del cual la densidad electrónica es estable en la superficie y no hay un flujo de transferencia neta de electrones). La fricción entre las superficies introduce calor, y este genera vibración de la red, lo cual genera fonones que deforman la red consiguiendo golpear los electrones para superar la diferencia de potencial.

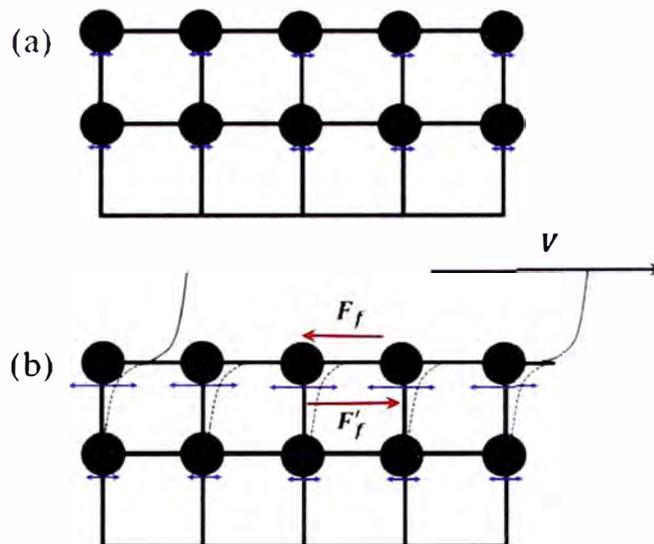


Figura 3. La deformación de la red y la vibración cambian cuando se ejerce un movimiento relativo y dos superficies se compactan juntas. (a) Modo de vibración de la red en equilibrio de una superficie sin fricción. (b) Modo de vibración de la red inducida por la fricción de una superficie cuando se ejerce fricción.

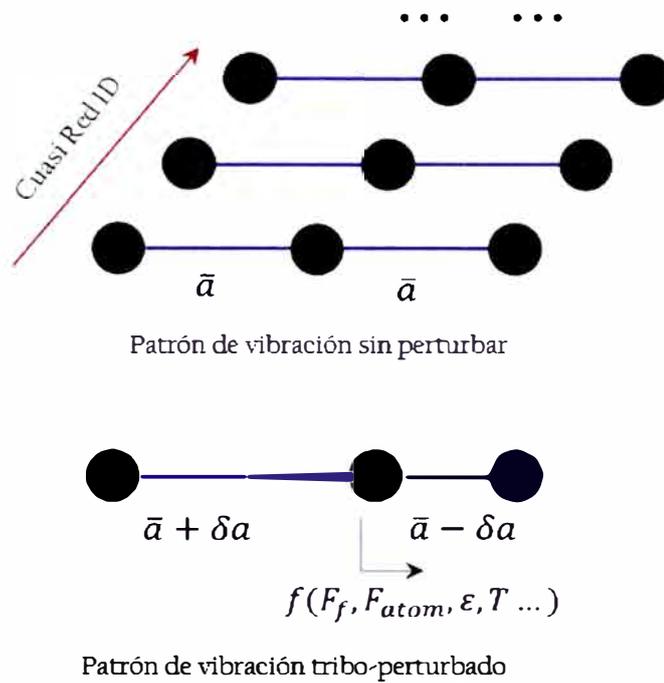


Figura 4. Representación de la distribución de la red para modos de vibración perturbados y no perturbados.

En el contacto entre dos superficies, las fuerzas normales entre estas dos producen deformación de la red, lo cual cambia los modos de vibración y así incrementa la posibilidad de tener fonones de mayor energía cuando la superficie de contacto de fricción se elimina y la red deformada vuelve a vibrar al estado original en un modo de “amortiguación” (para polímeros es mejor usar el término “Relajación de la cadena molecular desde el estado deformado” en vez de “deformación de la red”, ya que los polímeros pueden tener el mismo proceso de creación de fonones pero no tienen una geometría específica de red). La ecuación que gobierna el proceso es:

Para pares metal(donador)-dieléctrico:

$$\Delta E = (W_{sup-d-me}) + X_{a-di} \quad (3)$$

Para pares dieléctrico(donador)-dieléctrico:

$$\Delta E = (X_{d-di} + E_{gap-di}) + X_{a-di} \quad (4)$$

Los dieléctricos al no tener una red específica emiten un amplio espectro de fonones con varias energías bajo una misma condición de fricción. El proceso de carga se inicia sólo cuando la energía del fonón es igual o mayor que $W_{sup-d-me}$ para metales y $X_{d-di} + E_{gap-di}$ para dieléctricos donadores. Por lo cual un amplio espectro de energía de fonones garantiza la posibilidad de transferencia de electrones. Por otro lado, si dos superficies tienen una estructura muy regular (metal-metal), la energía del fonón puede ser pequeña (debido a la distribución compacta de átomos en el metal, lo que finalmente limita la posibilidad de energía de vibración) para transferir electrones. La Tabla 1 muestra la comparación de transferencia de electrones y se puede notar que los metales no son efectivos para realizar este proceso.

Tabla 1. Posible densidad de carga después de la transferencia electrónica para algunos materiales.

Material pair	Charge density (C/m ²)	Only metal involving	Lattice uniformity
Chromium-chromium	2.02×10^{-8}	Yes	Both high
Chromium-steel	3.37×10^{-8}	Yes	Both high
Chromium-gold	6.73×10^{-8}	Yes	Both high
Metal-SiO ₂ (quartz)	$\sim 10^{-5}$	No	Both high
Metal-NaCl	5.0×10^{-4}	No	Both high
Metal-nylon	$\sim 10^{-3}$	No	Polymer involved
Metal-PTFE	$\sim 10^{-4}$ - 10^{-3}	No	Polymer involved
Metal-polyimide	3.0×10^{-3}	No	Polymer involved

Entonces podemos comentar que la deformación del material genera cambios dinámicos de la red estructural, lo cual genera modos de vibración (fonones) resultando en una capacidad para transferir electrones.

Cuando la inicialización de carga ha terminado, la carga de fonón introducido en una superficie será usado para inducir más cargas en la otra superficie como se muestra en la siguiente figura.

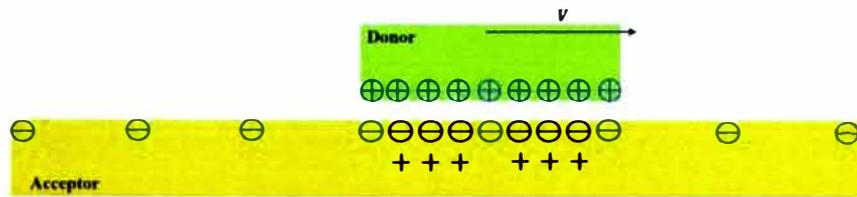


Figura 5. Ilustración de la distribución de carga del electrón sobre las superficies de fricción. Las cargas azules demuestran la transferencia de los electrones tribo-inducidos y su correspondiente carga; las cargas negras representan las cargas inducidas que no pueden cruzar la interfaz.

Cuando el estado estable es alcanzado, la máxima densidad de carga está limitada y regulada por la continuidad del efecto triboeléctrico (+), la posible ruptura dieléctrica de la capacitancia de la interfaz(vacío) (-) y la polarización de la cuasi capacitancia (-) (película de óxido formada sobre la superficie del metal). Los signos “+” y “-” indican el efecto de la acumulación de carga de este proceso. El voltaje interfacial es:

$$V_l = \frac{\sigma \cdot d}{\epsilon_0} \quad (5)$$

Donde d es la distancia entre las superficies, σ es la densidad de carga en el donador, y ϵ_0 es la capacitancia en el vacío.

La ecuación que gobierna el estado estable en forma de transferencia de energía en las superficies e interfaces es:

$$\Delta E + (V_b) \cdot e \geq E_{fonon\ max} \quad (6)$$

Donde V_b es el voltaje de ruptura dieléctrica, y (V_b) es el algoritmo para encontrar el voltaje razonable en la interfaz, el cual es el balance entre el voltaje de ruptura dieléctrica y el de la acumulación continua de carga.

La deformación por tensión es una forma eficaz de alterar la superficie de contacto y deformar la red cristalina o las cadenas moleculares, por lo cual la deformación es una forma de modificar los modos de los fonones.

$$\Delta S = V \cdot E \cdot \alpha_{1D} \cdot \varepsilon \quad (7)$$

Donde, ΔS es la variación de la entropía, E es el módulo de Young, V es el volumen original del material, α_{1D} es el coeficiente de expansión térmica en 1-D, ε es la deformación causada por la tensión. De la ecuación es fácil notar que un aumento de la deformación incrementa la entropía. Por otro lado, la entropía representa el nivel del caos y las diferentes formas de arreglo de un sistema. Es así como podemos mencionar que un incremento en la deformación incrementa la densidad de estados superficiales (mayor diversidad de arreglos de átomos, electrones e iones). Por lo tanto, podemos concluir que la deformación de los materiales contribuye al número de modos de fonones.

Para demostrar esta teoría experimentalmente usaron con PTFE (politetrafluoroetileno), Poliuretano(PU) y acero inoxidable (SS) en combinación con láminas de silicona de látex como par triboeléctrico (Pan & Zhang, Triboelectric effect: A new perspective on electron transfer process, 2017).

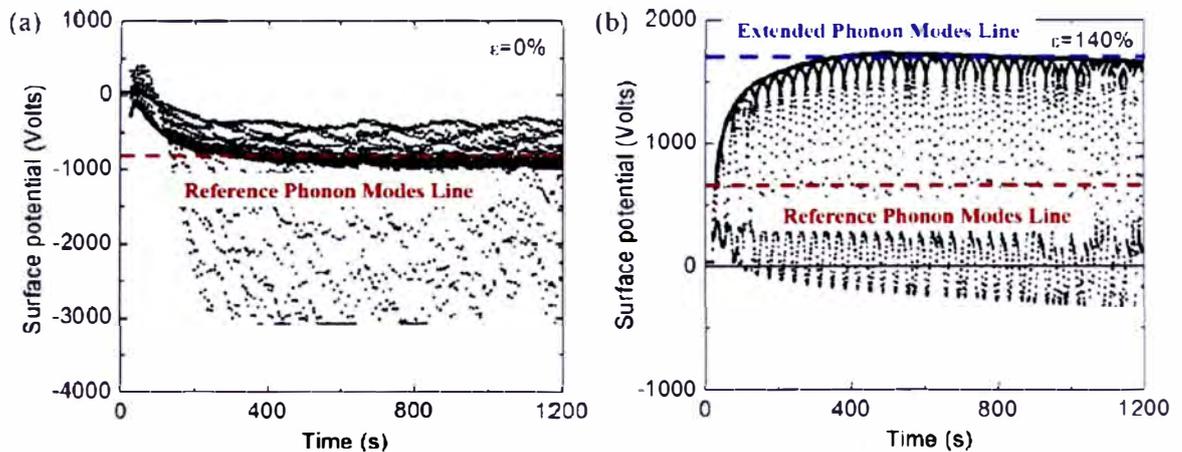


Figura 6. Medida del potencial superficial como una función del tiempo para par látex-PTFE. Las medidas fueron tomadas cerca de la superficie del látex. (a) Sin deformación, (b) Con deformación del látex de $\varepsilon = 140\%$. Las líneas rojas indican la información del cálculo teórico y la línea azul indica el ajuste para los modos extendidos.

Mientras no haya ruptura de la constante dieléctrica del medio, la densidad de carga superficial es proporcional a los modos del fonón. Como se muestra en la Fig.6(a), los modos originales originan un potencial $V_0 = 750 \pm 50V$. De acuerdo con la ecuación (7) para una deformación de 140% tendríamos $V_{deformado} = V_0 \cdot (1 + \epsilon) \cong 1800 \mp 120V$. Según las medidas mostradas en la Fig.6(b), el potencial experimental luego de la alteración de los fonones(deformación) el potencial es $V'_{deformado} = 1750 \mp 50V$. Esto da un error de -2.78% (Pan & Zhang, Triboelectric effect: A new perspective on electron transfer process, 2017). Esto se debe a que no se considera el cambio de volumen debido a la deformación.

Validación adicional a la teoría de los fonones se puede encontrar comparando las Figuras 6(a) y 7. La diferencia a nivel de complejidad en la estructura molecular de los pares triboeléctricos pueden inducir una mayor cantidad de modos de fonones, lo cual favorece al proceso triboeléctrico. Esto se puede sustentar en que la estructura molecular del PU es muchas veces más compleja que el PTFE, como se muestra en la Figura 7(b). Entonces PU puede tener más configuraciones superficiales en términos de tipos de átomos, tipos de uniones, y posibles modos de arreglos; por lo cual, en este sentido, el PU tiene una mayor superficie potencial debido a la existencia de más modos de fonones teóricos. Esto último se puede apreciar en la Figura 7(a), en donde el potencial de voltaje del PU alcanzado es casi cuatro veces el del PTFE (Pan & Zhang, Triboelectric effect: A new perspective on electron transfer process, 2017).

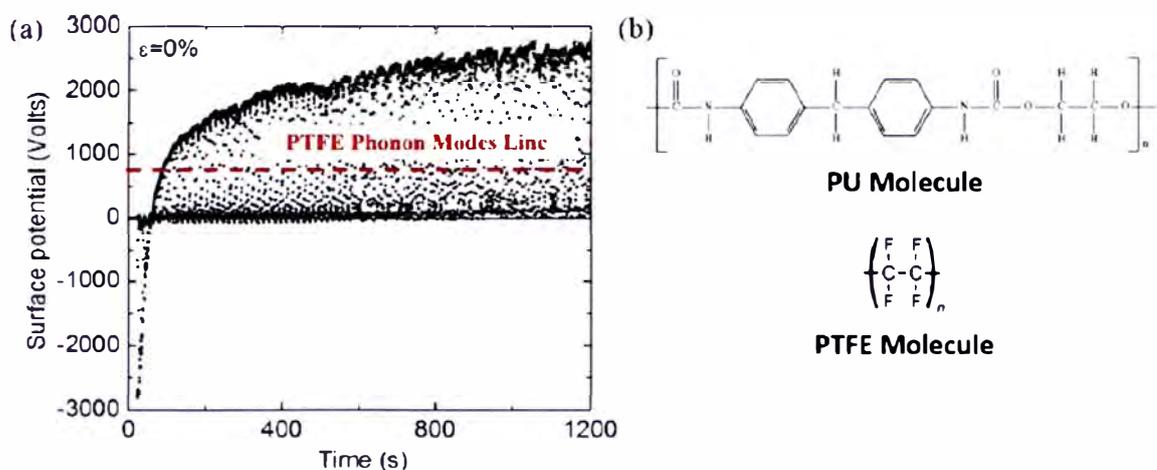


Figura 7. (a) Potencial superficial medido en función del tiempo cerca de la superficie de látex usando como material par al PU. (b) Estructura del PU y PTFE.

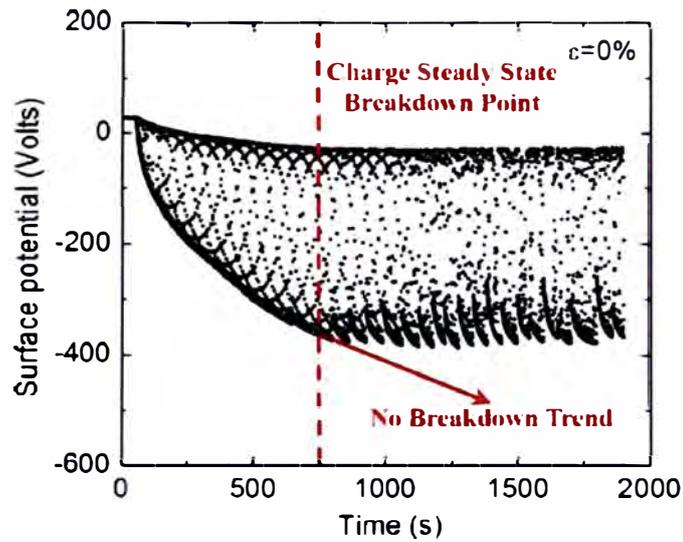


Figura 8. Medida de la superficie potencial como una función del tiempo para un par de contacto de acero inoxidable y látex sin deformar.

La Figura 8 muestra el mecanismo del estado estable para el efecto triboeléctrico. Esto muestra que el potencial de 400V para el par látex-acero inoxidable es debido al voltaje de ruptura del aire.

2.2. Nano Generadores Triboeléctricos

Los nano generadores triboeléctricos nacieron en el 2012 como una alternativa a la generación de energía eléctrica tradicional con combustible fósil. Los nano generadores triboeléctricos, o también conocidos como TENGs (por sus siglas en inglés Triboelectric Nanogenerator) funcionan bajo el contacto entre materiales de diferente naturaleza triboeléctrica, producto se esté contacto se da la electrificación electrostática (Triboelectrificación) entre las superficies de cada material. Con ayuda de una fuerza mecánica externa ambos materiales se separan y las cargas triboeléctricas inducidas viajan de un material dieléctrico a otro a través de un electrodo (Dharmasena, Jayawardena, Mills, Dorey, & Silva, A unified theoretical model for Triboelectric Nanogenerators, 2018).

Uno de los modelos más empleados para el fenómeno de inducción es el modelo del TENG como capacitor, en base a ello existe un modelo muy usado, el cual considera la dependencia de la distancia de separación, "Campo eléctrico dependiente de la distancia". El campo eléctrico promedio (E_z) sobre el punto medio de una superficie cargada con

dimensiones L(largo) y W(ancho), y con una densidad de carga superficial σ , puede ser calculada usando la ley de Gauss:

$$E_z = \frac{\sigma}{\pi\epsilon} \left(\frac{\frac{L}{W}}{2 \left(\frac{z}{W}\right) \sqrt{4 \left(\frac{z}{W}\right)^2 + \left(\frac{L}{W}\right)^2 + 1}} \right) = \frac{\sigma}{\pi\epsilon} f(z) \quad (8)$$

Donde z es la distancia desde la superficie cargada y ϵ es la permitividad del medio donde se propaga el campo eléctrico. El Anexo 1 muestra la demostración de esta y las siguientes fórmulas del fenómeno de triboelectrificación (Dharmasena, y otros, Triboelectric nanogenerators: providing a fundamental framework, 2017). Tomando en cuenta la fórmula descrita anteriormente y a partir de la Figura 9 se puede estimar el potencial en cada dieléctrico (a y b) de la siguiente manera:

$$\phi_a = -\frac{\sigma_U}{\pi\epsilon_a} \int_0^{x_a+z+x_b} f(x)dx + \frac{\sigma_T}{\pi\epsilon_a} \int_{x_a}^{x_a+z} f(x)dx \quad (9)$$

$$\phi_b = \frac{\sigma_U}{\pi\epsilon_b} \int_0^{x_a+z+x_b} f(x)dx - \frac{\sigma_T}{\pi\epsilon_b} \int_{x_b}^{z+x_b} f(x)dx \quad (10)$$

Donde σ_U es la densidad de carga libre en las superficies de los electrodos, σ_T es la densidad de carga triboeléctrica generada en las superficies de contacto del par de materiales triboeléctricos, x_a y x_b son los espesores de los materiales triboeléctricos a y b, ϵ_a y ϵ_b son las constantes dieléctricas para los materiales a y b, respectivamente. z es la distancia de separación entre los dos materiales dieléctricos, ϕ_a y ϕ_b son los potenciales eléctricos en los electrodos en contacto con los materiales a y b como se muestra en la Figura 9.

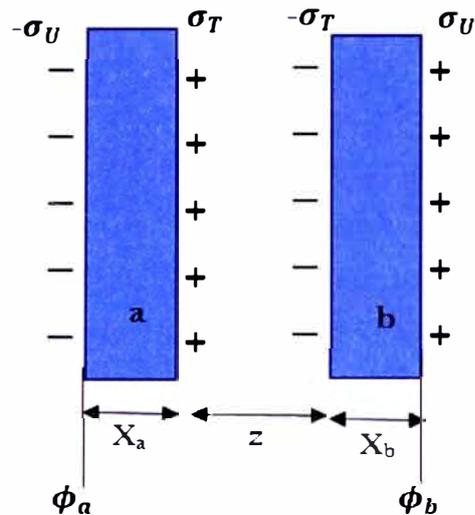


Figura 9. Representación gráfica de dos placas cargadas producto del efecto triboeléctrico.

Resultado el voltaje estimado entre los electrodos:

$$V = \phi_a - \phi_b \quad (11)$$

Para el estudio de un voltaje en circuito abierto se considera que no hay transferencia de carga y σ_U es igual a cero (Shao, Willatzen, & Wang, 2020).

Es así como los nanogeneradores triboeléctricos dependen del fenómeno de triboelectricidad, y la separación entre las superficies de contacto entre otros mecanismos de triboelectricidad que aún no están de todo explorados, estos están relacionados a la transferencia de electrones, iones o materiales cargados entre superficies. Al poner en contacto dos superficies, la densidad de carga triboeléctrica (σ_T) se incrementa y satura luego de un breve tiempo de iteraciones de contacto. Esta superficie no suele cambiar una vez que se alcanza la saturación. Otras consideraciones que se realizan cuando se intenta modelar el comportamiento de un Nanogenerador Triboeléctrico es la distribución homogénea de las cargas sobre las superficies de contacto y estas permanecen constantes durante todo el proceso de trabajo (Dharmasena, Jayawardena, Mills, Dorey, & Silva, A unified theoretical model for Triboelectric Nanogenerators, 2018).

Estos dispositivos tienen una amplia gama de aplicaciones como: monitoreo medioambiental, internet de las cosas (IoT), cuidado de la salud, vigilancia y seguridad de la infraestructura. Los TENGs son efectivos para recolectar energía del medio ambiente.

La naturaleza de la triboelectrificación es la transferencia de electrones entre dos superficies en contacto. La dirección del flujo de electrones depende de la naturaleza en la afinidad electrónica de los dos materiales. Por un lado, un material tendrá la mayor afinidad electrónica y atraerá electrones del otro, este material recibe el nombre de aceptor. El otro material que perderá electrones recibe el nombre de donador. En la Tabla 1 podemos encontrar un resumen de una serie de materiales triboeléctricos, en donde se indican los que presentan una carga positiva y una carga negativa según la interacción de los materiales.

Tabla 2. Serie Triboeléctrica. (Pan & Zhang, Triboelectric effect: A new perspective on electron transfer process, 2017)

More positively charged (+)	Δ
Rabbit's Fur, Hair	Brass
Glass	Silver
Mica	Gold
Wool	Polyester (PET)
Nylon	Polystyrene
Lead	Acrylic
Silk	Polyvinyl chloride
Aluminum	Polyvinyl chloride w/plasticizer
Paper	Silicon
Wood	Polyethylene
Amber	Polypropylene
Sealing wax	Polytrifluorochloroethylene
Rubber Balloon	Teflon (PTFE)
Nickel	Silicon Rubber
Copper	Ebonite
∇	More Negatively Charged (-)

* Pure polymers (not mixtures) are marked in red. Pure metals as the segregation points are marked in blue.

2.2.1. Tipos de Nanogeneradores Triboeléctricos

Existen cuatro tipos principales de generar energía eléctrica; el modo de separación por contacto vertical, el modo de deslizamiento en un plano, el modo de electrodo único y el modo de capa triboeléctrica independiente. En algunos casos pueden trabajar dos o más modos de trabajo en simultáneo.

Modo de separación por contacto vertical: Este modo de trabajo está basado en el contacto físico entre dos superficies de diferente afinidad electrónica, donde al menos un elemento debe ser un aislante. Al entrar en contacto se crean superficies de cargas opuestas. Cuando las dos superficies se separan, se crea un diferencial de potencial entre la superficie superior e inferior de los dieléctricos. Al conectar estos dieléctricos a electrodos y estos a su vez unirlos por una resistencia, los electrones libres fluyen de un lado del electrodo al otro con el fin de mantener el balance del campo electrostático. Una vez que las superficies electrostáticas vuelven a juntarse, la diferencia de potencial creada entre las dos superficies desaparece y los electrones inducidos regresan a su estado inicial. Si el contacto y separación entre las dos superficies se dan de manera constante, se produce una creación y desaparición de cargas y flujo de electrones inducidos que van de un lugar a otro por lo cual se genera una salida de corriente alterna. Este es el modo de TENGs más fácil de desarrollar en la práctica.

Modo de deslizamiento en un plano: Cuando dos superficies con polaridades triboeléctricas opuestas entran en contacto se genera una transferencia de carga superficial debido al efecto de triboelectrificación. Cuando dos superficies están en contacto completo no hay un flujo de electrones inducidos debido a que las cargas generadas a un lado de un dieléctrico son compensadas por las cargas generadas al otro lado del dieléctrico. Si estas dos superficies se desplazan lateralmente, en dirección paralela a la interfaz entre ambos materiales, debido a una fuerza externa se crea una polarización efectiva en la dirección paralela al desplazamiento. Luego si este movimiento es periódico y las salidas opuestas al dieléctrico van unidos a una carga, se produce una salida AC.

Modo de electrodo único: Se da entre un electrodo y un dieléctrico, en donde la corriente de inducción es creada en el metal cuando el dieléctrico cargado se acerca a él para balancear el campo eléctrico. Cuando el dieléctrico se aleja del metal, la corriente fluye de regreso a la tierra. Este modo trabaja en un intercambio de cargas entre el metal y la tierra.

Modo de capa triboeléctrica independiente: Este modo de trabajo se da cuando tenemos dos electrodos de similar medida debajo de un dieléctrico de medida cercana a los electrodos. Hay una pequeña distancia entre los electrodos y el dieléctrico. El dieléctrico se mueve lateralmente a lo largo de los electrodos creando una distribución de carga asimétrica vía inducción. Para conseguir esto el dieléctrico debe haber sido cargado anteriormente por un proceso triboeléctrico. Esto origina que los electrones viajan entre los electrodos para balancear la distribución del campo, ver Figura 10.d. La oscilación de cargas entre los dos electrodos es producto del movimiento de ida y vuelta del dieléctrico, esto produce una corriente de salida AC. Este modo de trabajo tiene la ventaja de poder almacenar energía de un objeto en movimiento con todo el sistema TENG en movimiento y sin la necesidad de colocarlo a tierra.

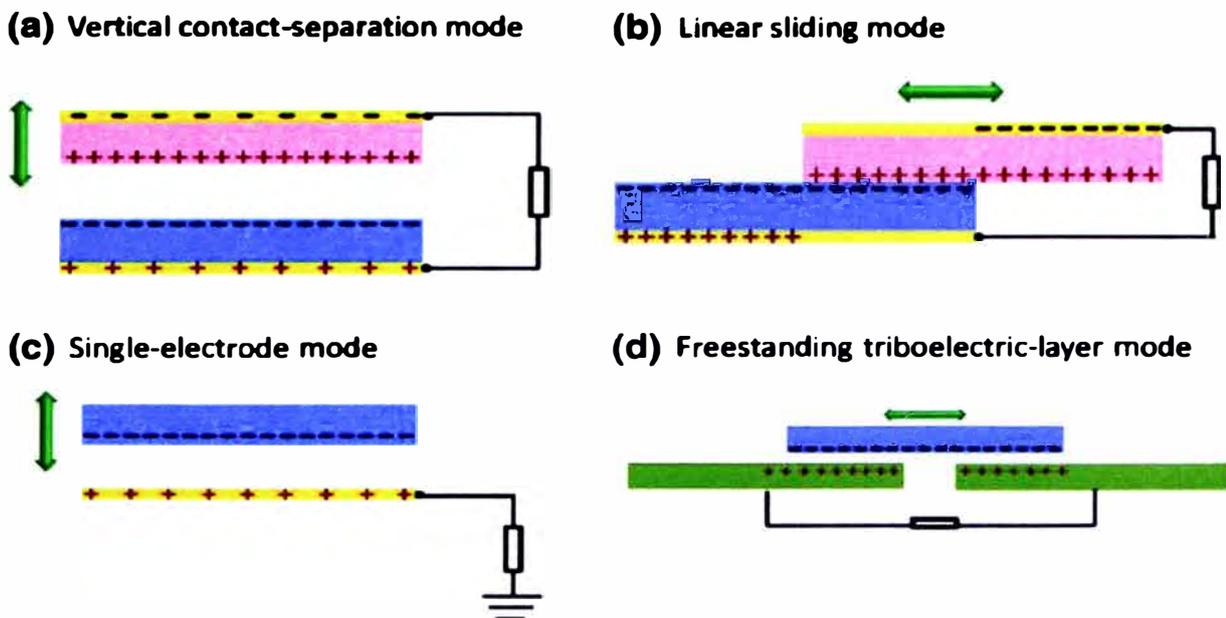


Figura 10. Los 4 principales modos de trabajo de un Nanogenerador triboeléctrico. a) Modo de separación de contacto vertical. b) Modo de deslizamiento lateral. c) Modo de electrodo único. d) Modo de desplazamiento libre. (Pan & Zhang, Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review, 2019)

2.3. Parámetros que influyen en el rendimiento de un TENG.

Uno de los parámetros que influyen en la selección de materiales son los tipos de material de los triboeléctricos en contacto. En teoría una mayor diferencia de afinidad eléctrica entre los materiales nos dará una mayor salida de carga. Sin embargo, el rendimiento de un TENG no solo se basa en su composición química sino también en otras características físicas como: elasticidad, fricción, estructura superficial topográfica entre otras. Además, también hay que tener en cuenta la aplicación que se le dará al dispositivo. Algunos dispositivos son buenos para almacenar energía, mientras otros son mejores para aplicaciones como sensor.

Uno de los parámetros que más influyen en la salida del generador triboeléctrico es la corriente de desplazamiento. La corriente de desplazamiento generada en un TENG es diferente a las que se presentan en las ecuaciones de Maxwell. En las ecuaciones de Maxwell la corriente de desplazamiento está definida por: $D = \epsilon_0 E + P$, donde: ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío, E es el campo eléctrico y P es el vector polarización. Aquí la polarización está inducida por un campo eléctrico externo. Sin embargo, en TENGs las cargas superficiales generadas son independientes de un campo eléctrico externo. Por lo tanto, un nuevo término necesita ser considerado, $D = \epsilon_0 E + P + P_s$. La densidad de corriente de desplazamiento (J_D) del TENG podría ser expresado como (Zhang & Olin, 2020):

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial P_s}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P_s}{\partial t} \quad (12)$$

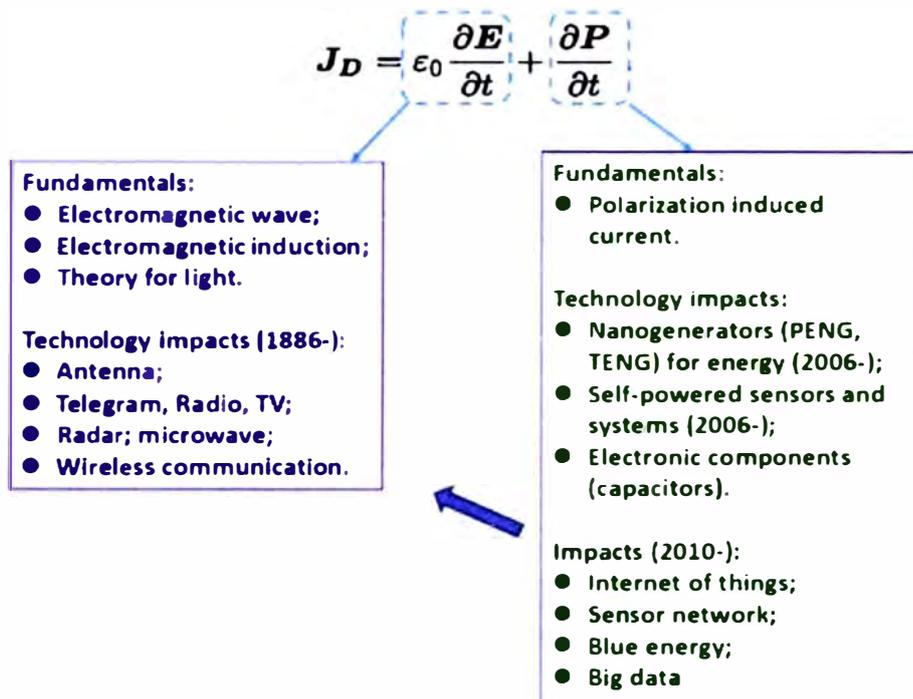


Figura 11. .La corriente de desplazamiento, fundamentos e impactos (Wang Z., 2017)

El primer término de la ecuación mostrada en la Figura 11 representa la electricidad debido a los efectos de la inducción magnética, lo cual representa la existencia de ondas electromagnéticas y la teoría de la luz. Estas teorías son la base para el desarrollo de la antena, TV, radio y todo lo relacionado a la tecnología de las telecomunicaciones inalámbricas. El segundo término es la corriente de desplazamiento y está relacionado a la polarización del medio, de donde se derivan los fundamentos para los nanogeneradores piezoeléctricos y triboeléctricos. Esta tecnología soportará a los dispositivos IoT, lo cual viene a ser la nueva tecnología en los próximos años. Si bien es cierto se conoce este fenómeno hace más de mil años, los fundamentos y mecanismo que gobiernan este fenómeno aún no están del todo claro (Wang Z. , 2017).

2.3.1. Espesor de capa

El espesor de capas es uno de los parámetros físicos que influyen en el rendimiento de un TENGs. El espesor de la capa puede influir directamente en la salida de voltaje. Por ejemplo, Robert et. al. desarrollaron un TENGs basado en almidón de papa

amarilla y evaluaron espesores de capa de 30, 60, 90 y 120 micras. la salida de voltaje para los espesores de 60, 90 y 120 micras no fueron muy notorias sin embargo para un espesor de 30 micras se puede observar un voltaje que llegó entre los 200 a 250 mV (Ccorahua, Huaroto, Luyo , Quintana, & Vela, 2019). Esto se observa en la Figura 12.

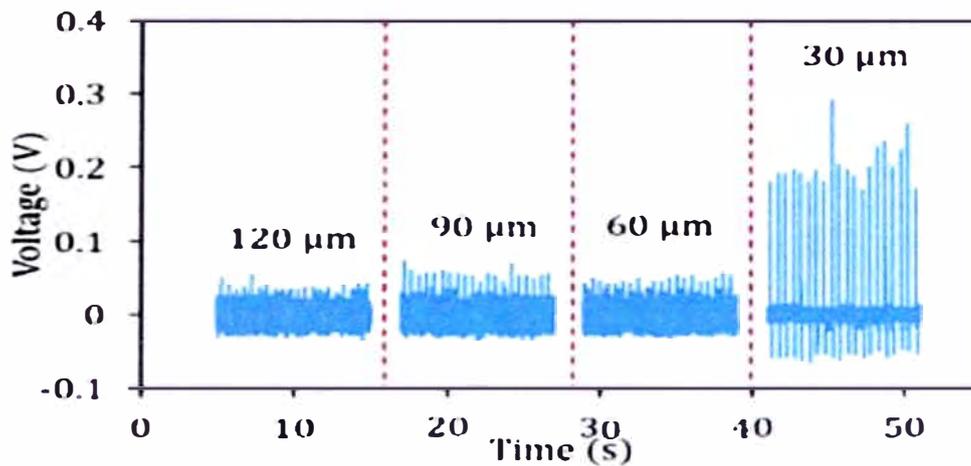


Figura 12. Influencia de la variación del espesor de capa del dieléctrico en la salida del voltaje para un TENG basado en almidón de papa (Ccorahua, Huaroto, Luyo , Quintana, & Vela, 2019)

Aunque se puede notar que a medida que disminuye el espesor del dieléctrico la salida de voltaje aumenta otros estudios han encontrado que esto no siempre se cumple, sino que hay un rango en el cual a medida que aumenta el espesor de capa aumenta la salida de voltaje. Uno de estos casos es el trabajo desarrollado por Lin Shi et. al. donde muestra que hay un espesor de capa óptimo. Ellos desarrollaron un dispositivo TENGs a base de PDMS. A medida que el espesor del PDMS aumenta de 30 a 65 micras la salida de voltaje aumenta desde 1450 V a 1750 V. Sin embargo, cuando el espesor del PDMS sigue aumentando, la salida de voltaje empieza a decaer hasta un valor de 595 V para un espesor de 175 micras. Esto podría indicar que a medida que el espesor de capa aumenta se obtiene una mayor carga triboeléctrica. Pero a medida que la capa del dieléctrico siga aumentando no se generan más cargas. Por otro lado, se nota que los efectos de la inducción electrostática disminuye a medida que el espesor de capa aumenta (Shi, y otros, 2019).

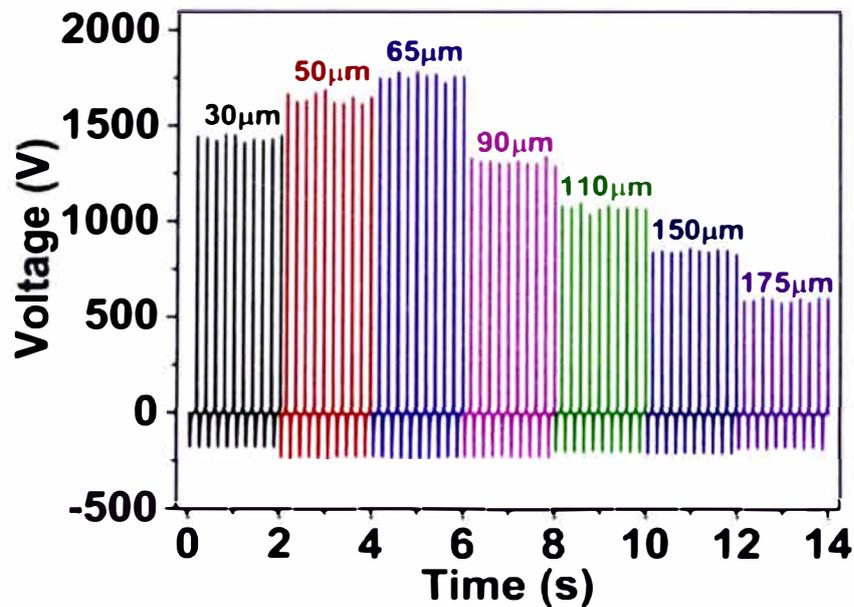


Figura 13. Influencia de la variación del espesor de capa del dieléctrico en la salida del voltaje para un TENG basado en PDMS (Shi, y otros, 2019).

Existen relaciones matemáticas donde se muestran la influencia de los espesores de dieléctricos en la salida de voltaje, aunque la expresión matemática no está del todo definida se puede observar que los espesores juegan un rol importante en el desempeño de un nanogenerador triboeléctrico (Wang Z. , 2017).

2.3.2. Superficie

Se cree y se ha encontrado que la topología de la superficie influye en la salida de voltaje debido al fenómeno triboeléctrico. Jaewook Ha et. al. desarrolló un dispositivo triboeléctrico basado en PFDMA (poli (1H,1H,2H,2H-metacrilato de perfluorodecilo)), aluminio y PET (Tereftalato de polietileno), ver Figura 14. La superficie morfológica fue desarrollada en arreglos de microvarillas de diferentes alturas (diámetro= 10um, paso= 20um, altura= 5,10 y 20 um). La salida de voltaje aumenta a medida que aumenta la altura de la superficie estructural. Una explicación de esta respuesta puede deberse al aumento del área de la superficie de contacto entre el PFDMA y el electrodo. Debido al incremento de la rugosidad superficial del PFDMA, el área efectiva entre PFDMA y la superficie del electrodo aumenta y produce una alta salida de voltaje (Ha, y otros, 2017). Anki Reddy Mule et. al.

desarrolló un nanogenerador triboeléctrico de alto rendimiento usando micropatrones de politetrafluoroetileno (MP-PTFE) y aluminio como materiales triboeléctricos. Los patrones fueron desarrollados vía litografía con ayuda de papel lijado como molde. Se probaron 4 tipos de superficies: plana, #800, #1000 y #1200. Las medidas de voltaje fueron realizadas a una fuerza de contacto y frecuencia de 4N y 5 Hz respectivamente. Para la superficie plana se obtiene un voltaje pico de 48V. Para una superficie de #1200 se obtuvo una mayor salida de voltaje, llegando a 200V aproximadamente. El rendimiento de la salida de voltaje fue mejorado al introducir micropatrones en la superficie de PTFE. Esto debido a que la rugosidad aumenta, así como la superficie de contacto entre el electrodo de Al y las películas de PTFE. A medida que el tamaño de grano de papel de lija sea mayor, la densidad de granos abrasivos será mayor. Por lo cual la cantidad de micropatrones en el PTFE será mayor. Entonces se espera tener una mayor área de contacto. Esta es la razón por la cual se consigue una mayor salida de voltaje para un papel lija de #1200 (Mule, Dudem, & Yu, 2018). Ver Figura 15.

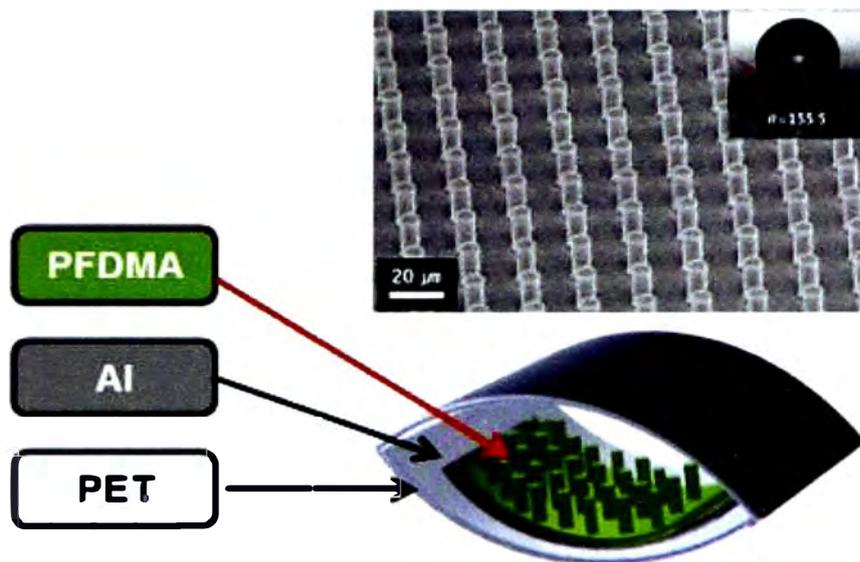


Figura 14. Nanogenerador triboeléctrico basado en micro varillas (Ha, y otros, 2017).

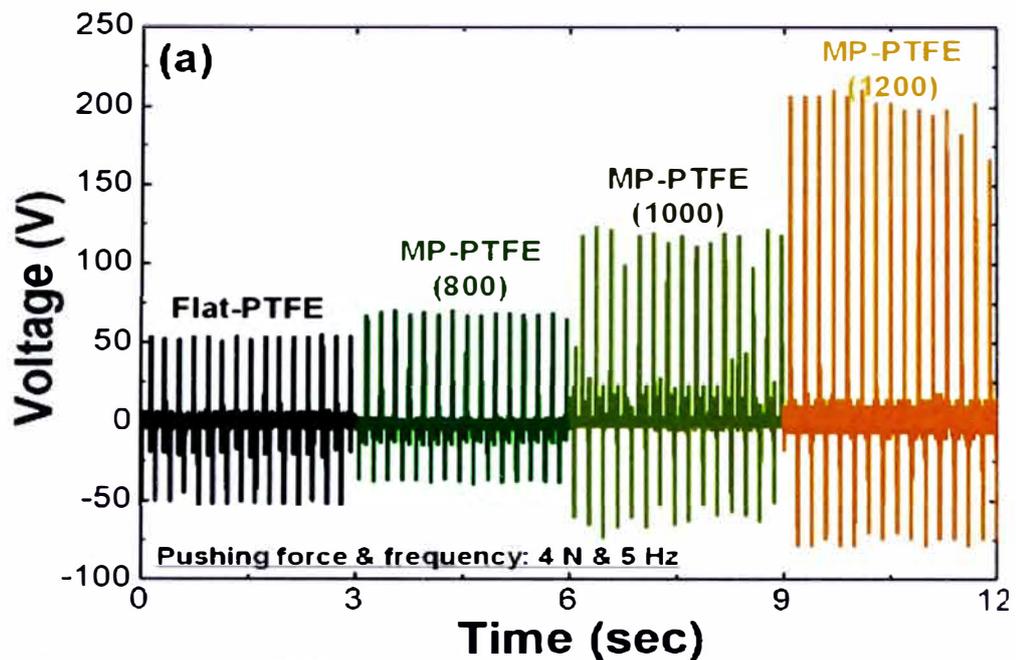


Figura 15. Nanogenerador triboeléctrico basado en PTFE y aluminio con superficie plana y patrones de papel lija de #800, #1000 y #1200 (Mule, Dudem, & Yu, 2018).

Feng-Ru et.al. desarrollaron un TENG transparente a base de PDMS como dieléctrico y óxido de indio y estaño como electrodo. Realizaron tres tipos de patrones en la superficie. Estos son: líneas, cubos y pirámides; además de fabricar una estructura plana. Las dimensiones de las estructuras superficiales están en el orden de los 5 a 10 micras como se puede apreciar en la Figura 16. En la evaluación de salida de voltaje se obtuvo una relación de eficiencia en el siguiente orden: film plano < línea < cubo < pirámide, ver Figura 17. Se registró una máxima salida de voltaje de 18V para una frecuencia de 0.33 Hz, lo cual es entre 5 a 6 veces superior a lo registrado en una superficie plana. La diferencia en la salida de voltajes de las diferentes estructuras puede deberse a los siguientes factores: (1) Lo sofisticado que puede ser la superficie. Se puede observar que a mayor complejidad se obtiene una salida que supera con creces a una estructura plana. (2) La variación de capacitancia en el proceso de deformación es mejorado significativamente. Esto se debe a la presencia de los vacíos de aire lo cual conlleva al aumento de la constante dieléctrica efectiva. (3) Debido a las películas microestructuradas, las cargas triboeléctricas son más fácilmente separadas, por lo cual se forma un momento dipolar mayor entre los electrodos (Fan, Tian, & Wang, 2012).

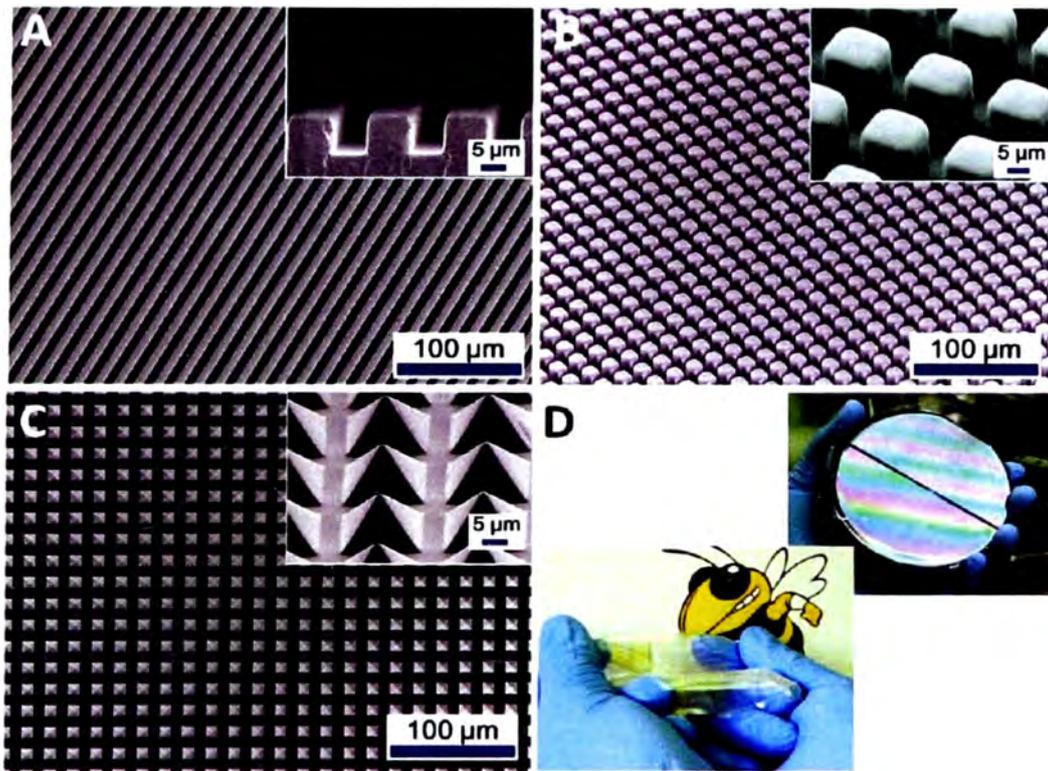


Figura 16. Nanogenerador triboeléctrico basado en óxido de indio y estaño como electrodos y PDMS con diferentes patrones morfológicos superficiales como dieléctrico (Fan, Tian, & Wang, 2012).

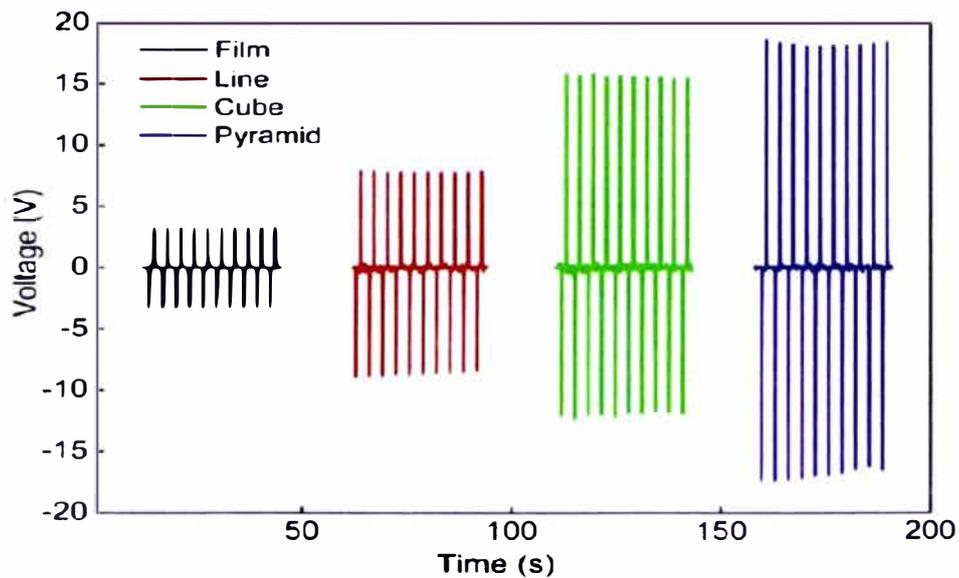


Figura 17. Variación de voltaje de Nanogenerador triboeléctrico basado en óxido de indio y estaño como electrodos y PDMS con diferentes patrones morfológicos superficiales como dieléctrico (Fan, Tian, & Wang, 2012).

2.3.3 Frecuencia de contacto

La frecuencia juega un rol importante en la salida del voltaje. Injamamul Arief et. al. desarrollo TENGs basados en un fluoroelastómero y electrodos de grafeno, con el cual se realizó pruebas variando la frecuencia desde 1Hz a 5Hz encontrando un incremento en la salida de voltaje de hasta 200%, ver Figura 18. Esto se podría explicar ya que a mayores frecuencias no le da tiempo al sistema que alcance la neutralización de las cargas, lo cual conlleva a alcanzar un mayor voltaje de salida. Debido a que el espacio de separación entre los electrodos es mucho más grande que el espesor de la película del dieléctrico, el movimiento de separación desde el contacto da la mayor salida de voltaje, mientras que el movimiento desde la separación hasta el contacto da la menor salida de voltaje (Arief, y otros, 2022).

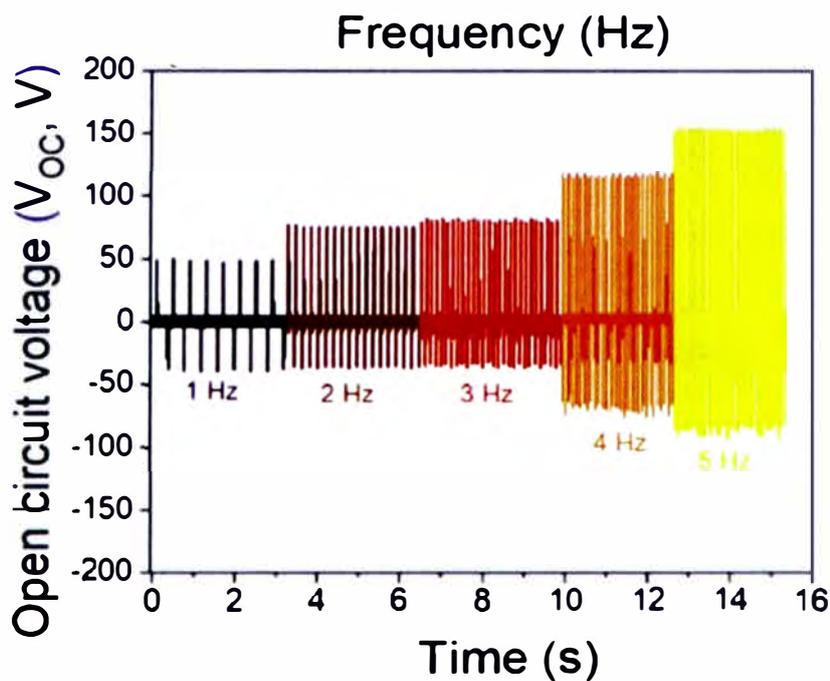


Figura 18. Variación de voltaje de salida con respecto a la variación de frecuencia para una TENGs basado en fluoroelastómero y electrodos de grafeno (Arief, y otros, 2022).

Por otro lado, Robert et. al. trabajó en un TENG a base de almidón de papa y electrodo de aluminio. Trabajo con frecuencias de 1, 2, 4 y 8 Hz. De donde se puede observar el incremento en la salida de voltaje en hasta un 50% a los 4 Hz, ver Figura 8. Se puede observar de la gráfica que a los 4 Hz se alcanza un mayor rendimiento o saturación. Lo cual podría indicar que no es necesario trabajar a frecuencias más altas

para tener un mejor rendimiento. Una posible causa de este fenómeno es que las cargas positivas y negativas en las superficies se neutralizan de forma menos natural debido a la alta frecuencia de deformación, lo que da como resultado una mayor acumulación de carga en los electrodos (Ccorahua, Huaroto, Luyo , Quintana, & Vela, 2019).

Lin Shi et. al. desarrollaron un TENG a base de PDMS y electrodo de aluminio, en donde estudiaron una serie de parámetros para encontrar los más adecuados para mejorar la eficiencia del TENG. Uno de estos parámetros fue la frecuencia de contacto, probaron con frecuencias de 1, 2, 4 y 8 Hz, de donde observaron que un aumento de la frecuencia aumentó la salida de voltaje desde aproximadamente 1390 V hasta 1768 V (Shi, y otros, 2019).

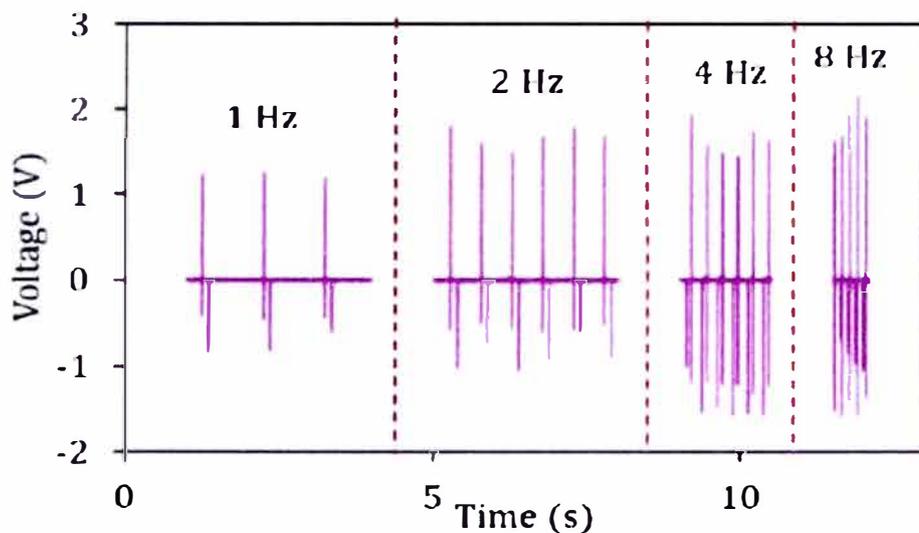


Figura 19. Variación de voltaje de salida con respecto a la variación de frecuencia para una TENGs basado en almidón de papa y electrodos de aluminio (Ccorahua, Huaroto, Luyo, Quintana, & Vela, 2019).

2.3.4. Fuerza de contacto

La salida eléctrica de un TENG se ve influida, también, en gran medida por la fuerza de empuje aplicada al momento del contacto. Anki Reddy et. al. trabajo en el desarrollo de un dispositivo TENG a base de politetrafluoroetileno (PTFE) y aluminio como materiales triboeléctricos con tendencias opuestas. Este dispositivo fue sometido a fuerzas de contacto de cantidades 2 N, 4 N y 6 N. El voltaje aumentó desde los 150 V hasta los 302 V al incrementar la fuerza de contacto desde los 2 N a los 6 N. Esto se puede explicar debido a la mejora en el área de contacto entre el dieléctrico y el electrodo (Mule, Dudem, & Yu, 2018).

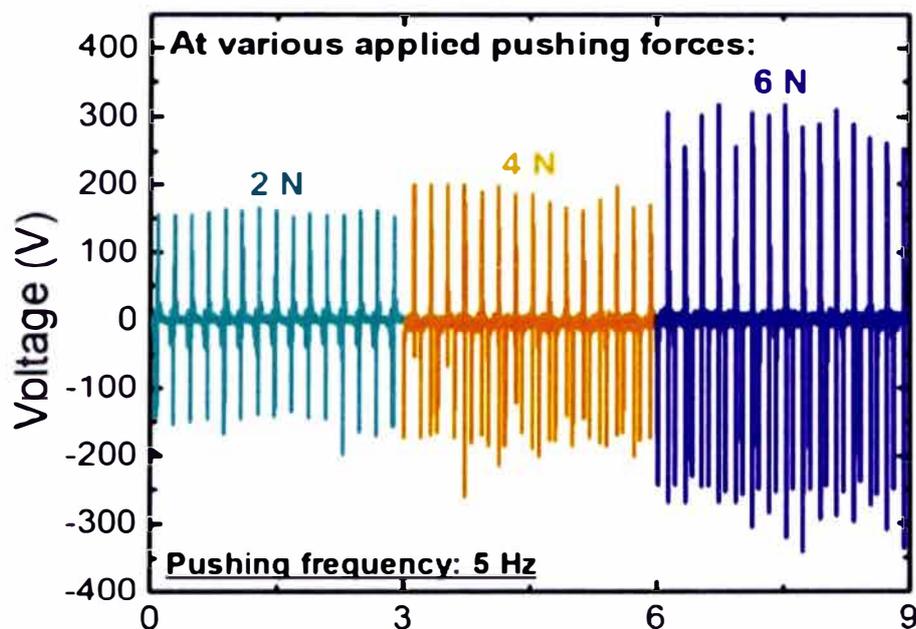


Figura 20. Variación de voltaje de salida con respecto a la fuerza aplicada para una TENGs basado en politetrafluoroetileno y electrodos de aluminio (Mule, Dudem, & Yu, 2018).

Robert et. al. encontró un aumento de salida de voltaje para un TENG a base de almidón de papa y aluminio. La salida aumentó desde aproximadamente 1 V a 2 V para un aumento de fuerza de contacto desde los 3 N hasta los 10 N, ver Figura 21 (Ccorahua, Huaroto, Luyo, Quintana, & Vela, 2019).

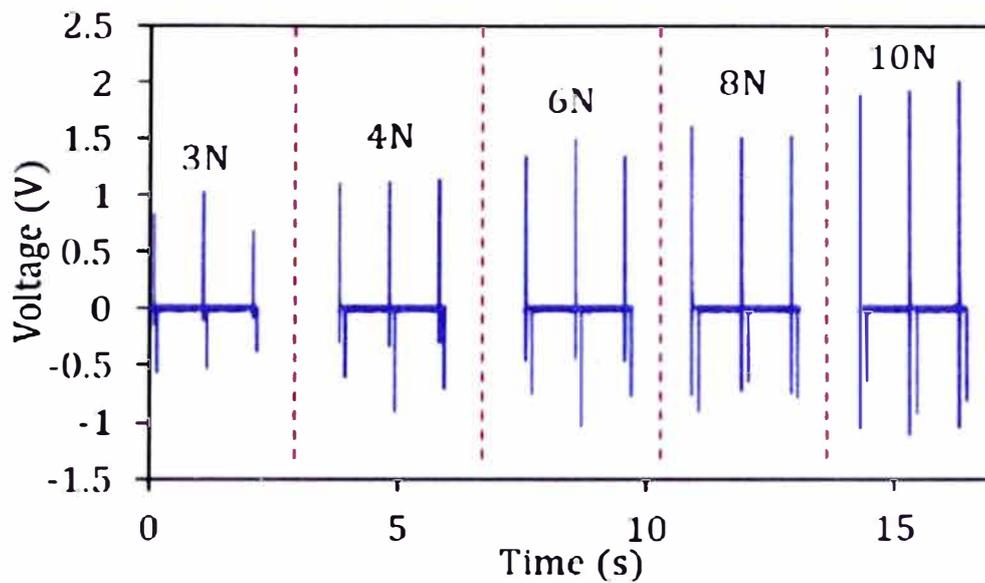


Figura 21. Variación de voltaje de salida con respecto a la fuerza aplicada para una TENGs basado en almidón de papa y aluminio (Ccorahua, Huaroto, Luyo, Quintana, & Vela, 2019).

Lin Shi et. al. desarrolló un dispositivo triboeléctrico a base de PDMS y poliamida-6 y electrodo de aluminio. Aplicaron varias fuerzas externas de contacto, las cuales variaron entre 30 a 90 N con una frecuencia de contacto y una distancia de separación de 5 Hz y 4 mm, respectivamente. Pudieron observar que el voltaje aumentó grandemente desde los 1503 V hasta los 1878 V con un incremento de fuerza de contacto desde los 30 N hasta los 70 N, y finalmente se llegó hasta los 1880 V para una fuerza de contacto de 90 N. Hay dos razones que podrían explicar esta correlación entre la fuerza aplicada y la salida de voltaje. Primero, debido a la elasticidad de los tribo-materiales, el área de contacto efectiva aumenta a medida que la fuerza de contacto aumente, entonces, se generan más cargas triboeléctricas, lo que hace que el TENG tenga un mayor voltaje de salida. Otra razón es debido a la mejora de la capacitancia del TENG cuando la película del PDMS se deforma más grandemente debido a una alta fuerza externa, lo que ocasiona que se almacenen más cargas en el TENG (Shi, y otros, 2019).

2.4. Técnicas de caracterización

2.4.1. Microscopía de fuerza atómica

Conocido también como microscopio de fuerza de barrido (SFM, por sus siglas en inglés Scanning Force Microscope). Este tipo de microscopios puede medir la topología superficial tanto de materiales conductores como aislantes. En un microscopio de fuerza atómica se mide la fuerza entre la punta de medición(cantilever) y la superficie de la muestra, ver Figura 22. La fuerza entre la punta y la muestra puede ser medida en modo estático usando la deflexión de un resorte plano en forma de paralelepípedo (Cantilever) con una punta en su extremo. La deflexión es proporcional a la fuerza entre la punta y la muestra. Un láser apunta al cantilever y la reflexión de este es medido en un detector, estas variaciones en la medición proporcionan la topografía de la superficie (Guo, 2018).

Tabla 3. Análisis AFM de valores R_{rms} , áreas de superficie y ángulos de contacto de PTFE tratado con varias condiciones de plasma (Prada, y otros, 2021).

Plasma treatment	R_{rms} (nm)	Surface area (μm^2)	Contact angle ($^\circ$)
Pristine PTFE	29.85	25.78	96.5
Ar	35.21	32.84	96.7
O ₂	75.06	34.81	157.1
Ar/O ₂	72.69	36.80	143.2
O ₂ /Ar	72.73	48.91	147.8

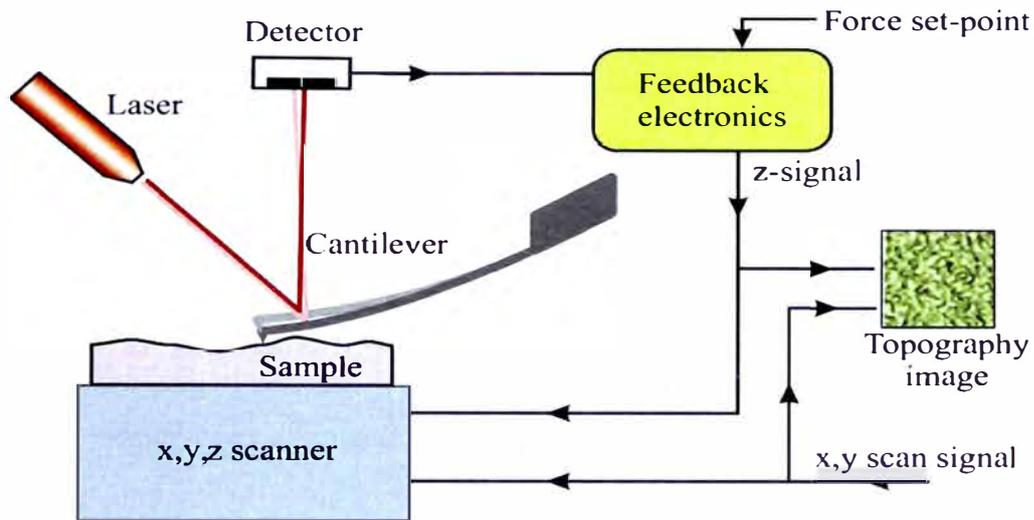


Figura 22. Esquema de operación de un microscopio de fuerza atómica (modo estático) (Prada, y otros, 2021).

2.4.2. Difracción de rayos X

Es una técnica usada para estudiar y caracterizar la cristalinidad de materiales. Esta técnica provee información de fases, estructura, orientación y otros parámetros estructurales. Los picos de difracción de rayos X son producidos por interferencia constructiva de rayos X dispersados para ángulos específicos (Andrea Bunaciu, Elena Gabriela Udristoiu, & Hassan Y. Aboul-Enein, 2015). Estos picos son una especie de huella digital para las estructuras moleculares. En nanogeneradores triboeléctricos la difracción por rayos X es usada cuando los materiales son alterados químicamente para mejorar sus propiedades triboeléctricas.

2.5. Modelamiento de un TENG como un capacitor

En la figura 23 se muestra el funcionamiento de un TENG modelado como un capacitor en el cual dos materiales aislantes, conocidos como dieléctricos, están entre dos electrodos. En el caso mostrado se emplean los aislantes (dieléctricos) Kapton y PMMA, cuando estos dos dieléctricos entran en contacto, Figura 23-II, se genera una carga superficial sobre las cargas de los dieléctricos puestos en contacto, esto debido al efecto de electrificación (Zhu, y otros, 2012). Para la configuración de circuito abierto, a medida que los dieléctricos se van separando va apareciendo un potencial eléctrico. Si consideramos un electrodo como potencial cero, podemos estimar que el potencial eléctrico del dispositivo es:

$$V_K = -\frac{\sigma d_3}{\epsilon_0} \quad (13)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad en el vacío, σ es la densidad de carga superficial triboeléctrica y d_3 es la distancia/separación máxima entre los dieléctricos. El máximo potencial se consigue cuando se produce nuevamente el regreso al contacto luego que se ha alcanzado la máxima separación entre los dieléctricos. Luego cuando estos vuelven a entrar en contacto se alcanza un potencial eléctrico de cero. Y de esta manera se consigue periodos potenciales alternativos a medida que continúa el ciclo de contacto (Zhu, y otros, 2012).

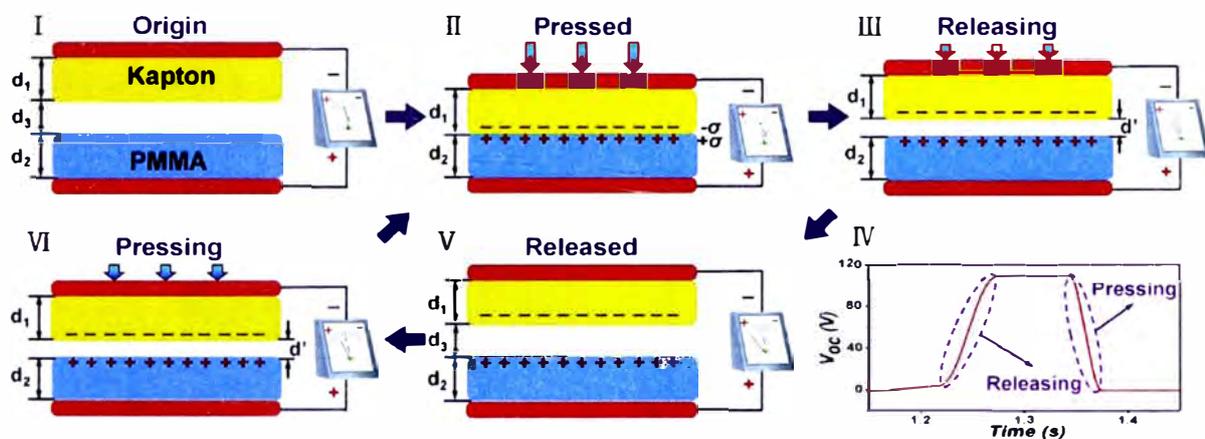
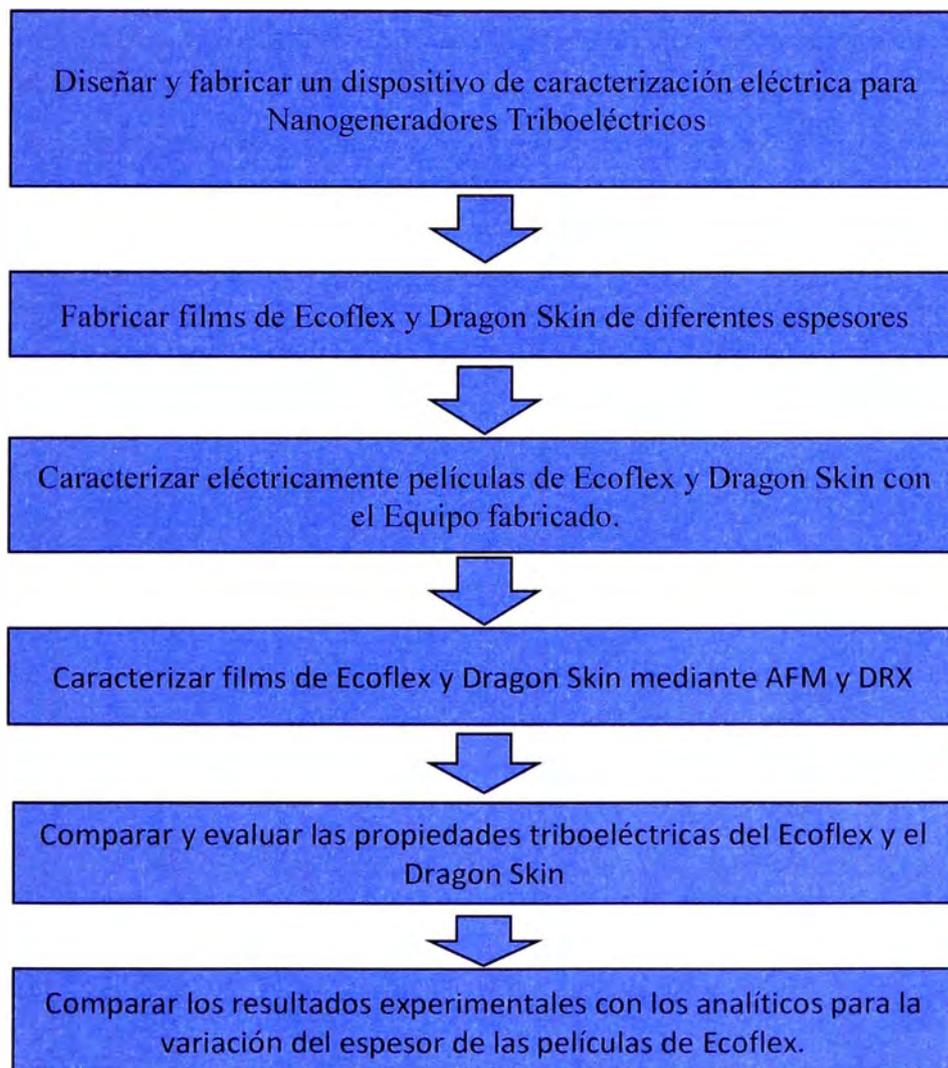


Figura 23.. Pasos que muestran el principio de funcionamiento de un TENG en condición de circuito abierto (Zhu, y otros, 2012).

CAPITULO III. METODOLOGÍA

Para este trabajo se espera estudiar las características eléctricas de siliconas de Ecoflex 0030 y Dragon Skin 0030 variando el espesor de capas, la frecuencia de contacto y registrando la fuerza de contacto en cada ensayo. También se estudiará la variación del área de contacto para la silicona de Dragon skin. Para estos ensayos se diseñará y fabricará un dispositivo portátil y ligero que nos permita estudiar las características antes mencionadas. Por otro lado, también se estudiará la influencia de la morfología de la superficie en la salida de voltaje para cada silicona y para complementar estos análisis se estudiará a las siliconas mediante las tecnologías AFM y DRX. Luego de ello se continúa a evaluar analíticamente la influencia del espesor de capa del dieléctrico del Ecoflex y se compara con los resultados experimentales. A continuación, se presenta un flujo metodológico de trabajo:



3.1. Diseño y fabricación de un sistema de caracterización TENGs

El sistema de caracterización para TENGs está diseñado para trabajar bajo el modo de contacto directo. Para lo cual tenemos que representar el mecanismo del movimiento de contacto. Los requerimientos son: permitir cambiar el espesor de las películas a estudiar, cambiar la frecuencia de contacto y leer la fuerza de golpe en cada contacto. El diseño fue elaborado en el software de modelado en la nube llamado Onshape. El movimiento de contacto del sistema está basado en el mecanismo biela manivela. Para variar la frecuencia de contacto se cuenta con un controlador o variador de frecuencia TB6560 para cambiar los rpm del motor, este está basado en tres valores de niveles bajo, medio y alto. Estos valores indican la frecuencia del ciclo de marcha en promedio de una persona caminando, trotando y corriendo. Estos valores se obtuvieron de manera experimental. Para el hardware se usó un motor a pasos NEMA 17. Además, cuenta con un sensor piezoeléctrico FSR 402 para la medición de la fuerza de golpe. Tanto el motor como el sensor de fuerza son controlados por un microprocesador Arduino UNO. El sistema cuenta con un jack de alimentación de fuente externa de 12V. El sistema está diseñado para películas de área de 2cmx2cm. Las dimensiones generales del equipo son de aproximadamente 250x150x150mm, por lo que este puede ser considerado portable. Estos detalles se pueden ver en la Figura 24.

Para la fabricación estructural se usó PLA y este fue fabricado mediante la impresora 3D MINGDA MD-6C de tecnología de FDM, por sus siglas en inglés Fused Deposition Modeling. También se usó una cortadora láser de marca AKJI39H-2 para fabricar la superficie superior que soporta componentes como el motor, el sistema de movimiento biela-manivela y los soportes de las películas. La programación fue realizada en el entorno de Arduino.

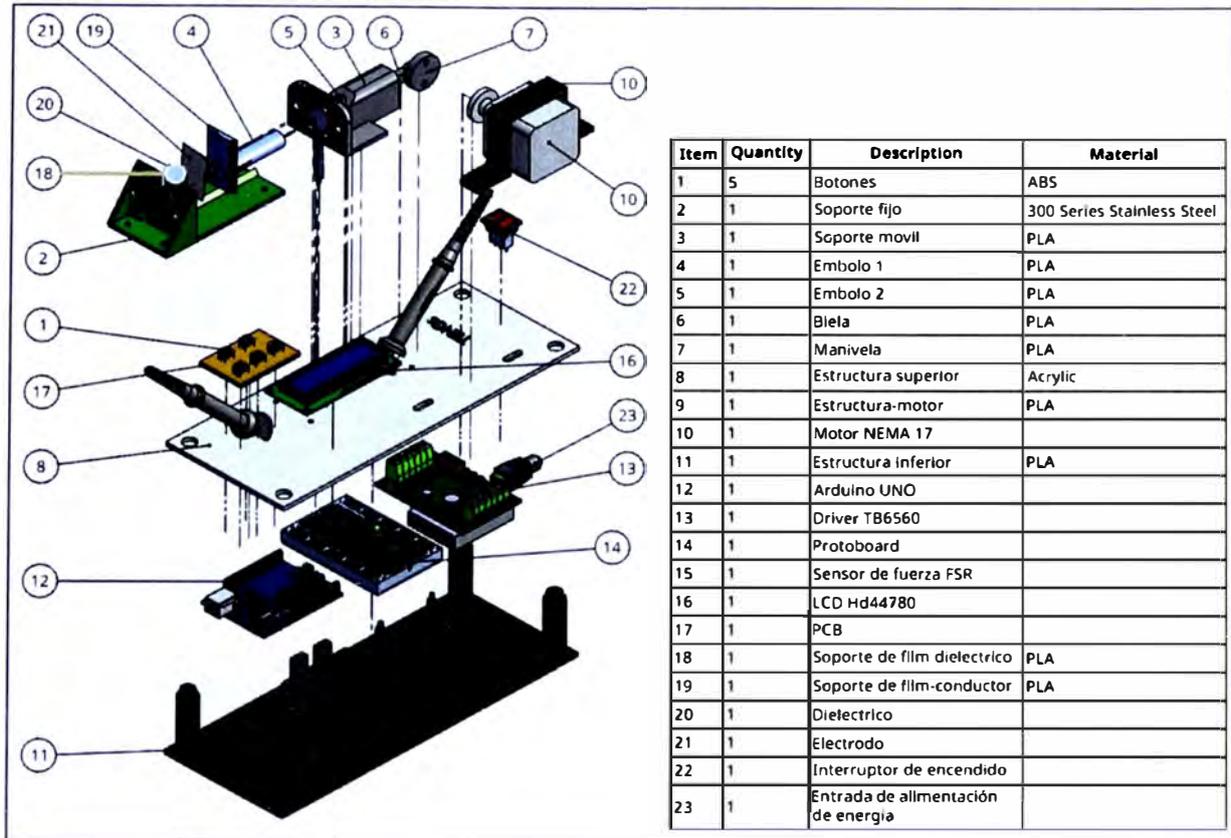


Figura 24. Despiece de los elementos que componen el sistema de caracterización TENGs.

3.2. Desarrollo de películas del elastómero Ecoflex 030 y Dragon Skin 030

Tanto el elastómero Ecoflex 030 como el Dragon Skin 030 vienen en dos partes líquidas A y B, cuando estas se mezclan se produce una reacción química que permite que se polimericen (solidifiquen) y se conviertan en un elastómero. La mezcla recomendada es en una proporción de 50/50. Para calcular la altura de la película usamos una placa Petri de diámetro 10 mm. Teniendo como dato el diámetro de la placa Petri podemos calcular el área de la superficie, luego considerando una altura deseada fija podemos estimar el volumen de Ecoflex o Dragon Skin a usar. Con ayuda de una balanza analítica y conocida la densidad tanto del Ecoflex como el Dragon Skin podemos determinar el volumen deseado. La mezcla se deja secar por alrededor de unas 4 horas aproximadamente a temperatura ambiente. El resultado de espesor de capa fue medido con ayuda de un micrómetro digital EC-770S 0-2000 um/1um. Ver Figura 25.

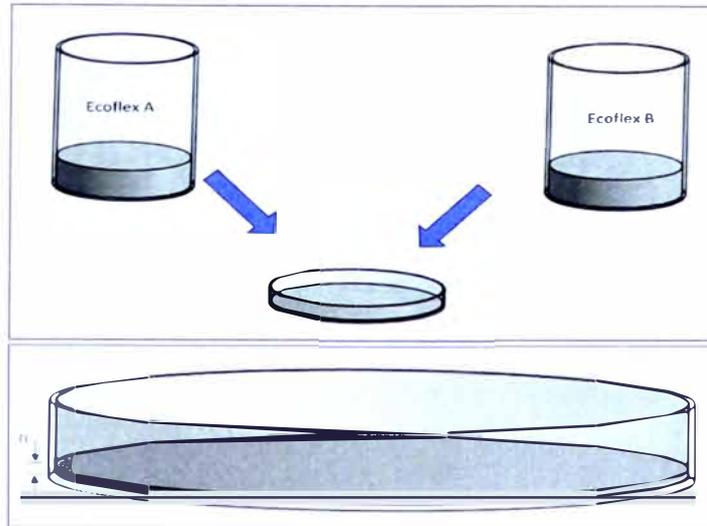


Figura 25. Proceso de formación de las películas de silicona.

Se modelaron películas tanto de Ecoflex como de Dragon Skin de diferentes espesores, lo cuales son: 100 μm , 200 μm , 300 μm , 400 μm , 500 μm , 600 μm , 700 μm , 800 μm , 900 μm , 1000 μm , 1250 μm , 1500 μm , 1750 μm y 2000 μm . Luego para el análisis de la influencia del área sobre la salida de voltaje se fabricaron películas de área de 23mm x 23mm con agujeros de diámetros de 1, 1.2, 1.4 y 1.6mm para películas de espesores que oscilan entre 1 a 2 mm. Para esta fabricación se diseñó un patrón de barras cilíndricas separadas 2.8 mm. Ver Figura 26.

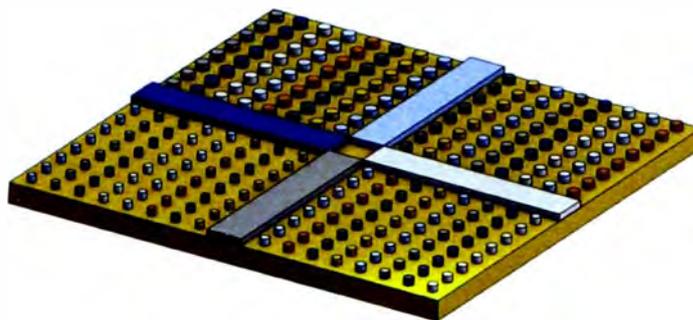


Figura 26. Modelado de los patrones de poros generados para las películas.

3.3. Caracterización eléctrica de las películas y superficies de Silicona Ecoflex

Para esta caracterización se usó el equipo de caracterización fabricado en la presente investigación. Para ello se detallan los pasos que se siguieron:

Colocación de láminas

Las láminas con el material dieléctrico a analizar serán colocadas por medio de una rendija en la parte superior del soporte fijo, está será ubicada justo delante del sensor de fuerza FSR402; las láminas complementarias (dieléctrico o conductor) serán pegadas con una cinta de doble contacto al eje de contacto. (foto de referencia)

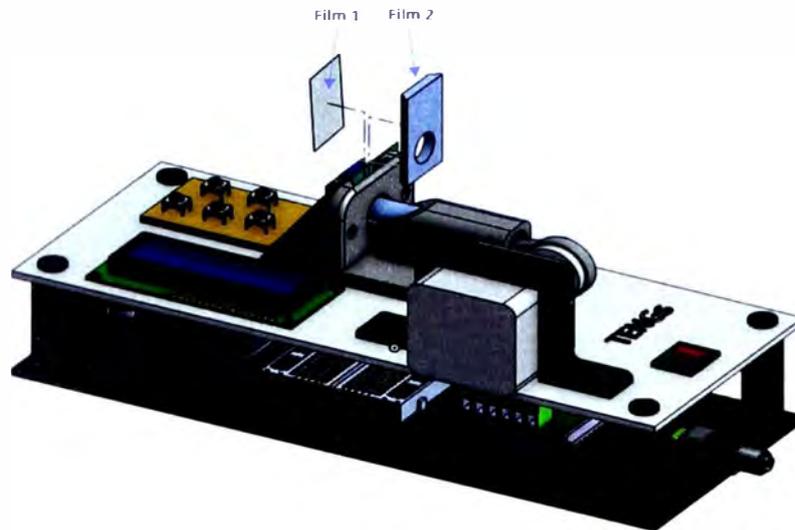
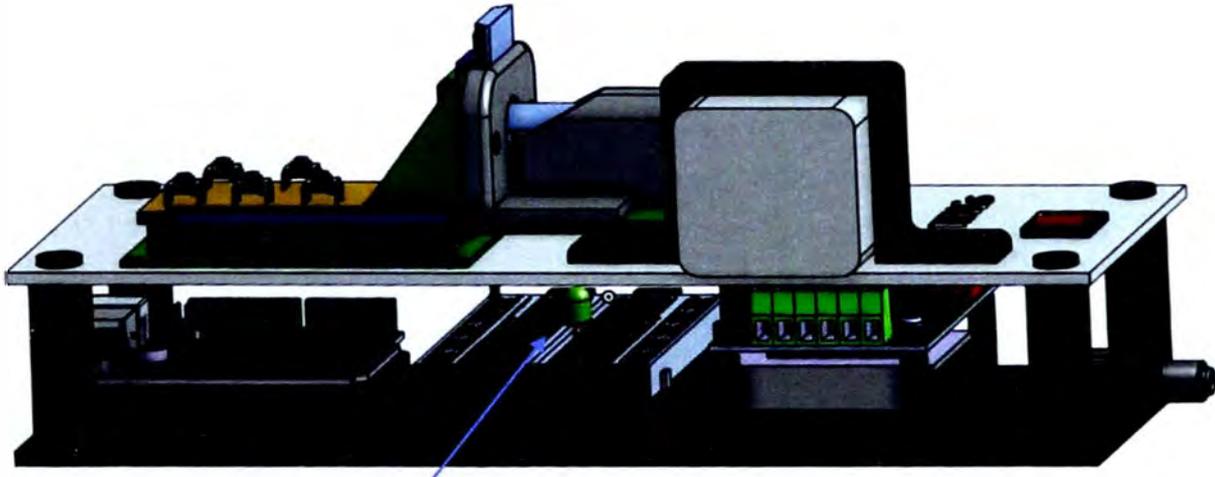


Figura 27. Colocación de los filmes.

Ensamblaje

Hay que asegurarnos que todo el sistema esté energizado, esto lo podemos corroborar cuando el foco led prende, los elementos de la mesa superior deben estar correctamente ubicados y sujetos por los pernos; se debe establecer la posición espacial del NEMA 17 de acuerdo con la medida que se desea analizar, pues de esto depende la fuerza aplicada entre las láminas, gracias al resorte entre el émbolo y el eje de contacto, ver Figura 28.



Led encendido

Figura 28. Led indicador que el sistema está energizado.

Conexión al osciloscopio (Usar sonda 1X)

El osciloscopio se encargará de medir las señales eléctricas que se generen por el dispositivo. para eso es necesario conectar las sondas de osciloscopio en los cables que se encuentran conectados a cada lámina a analizar (el cable del GND de la sonda puede estar en cualquiera de los dos dieléctricos). Ver Figura 29.

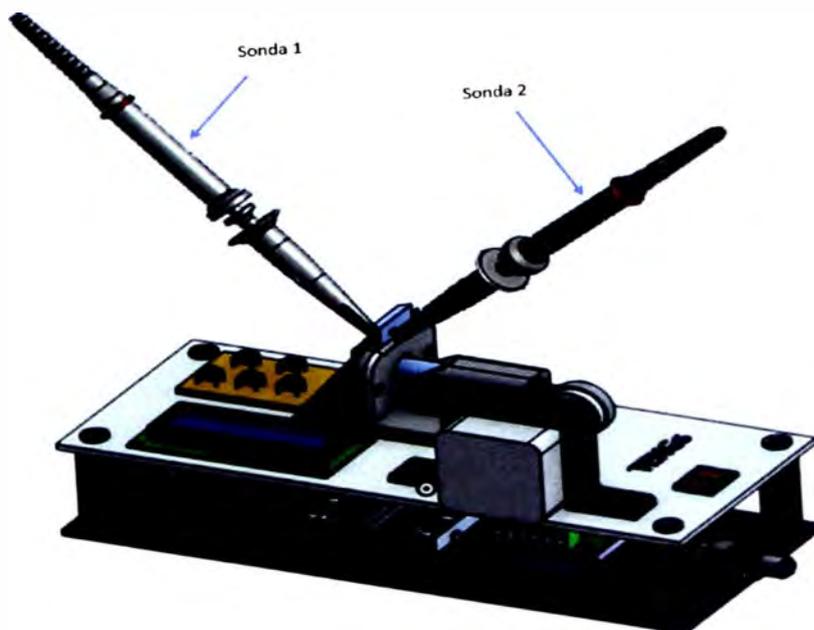


Figura 29. Colocación de sondas de osciloscopio.

Encendido general

Una vez realizados los pasos anteriores se enciende el dispositivo con el interruptor de color rojo. El dispositivo funcionará a una frecuencia de contacto predeterminada de 1.67 Hz. Luego de ello se podrá observar en la pantalla del equipo la fuerza de contacto y la frecuencia de trabajo. Y los voltajes que produce cada lámina podrán ser leídos en la pantalla del osciloscopio.

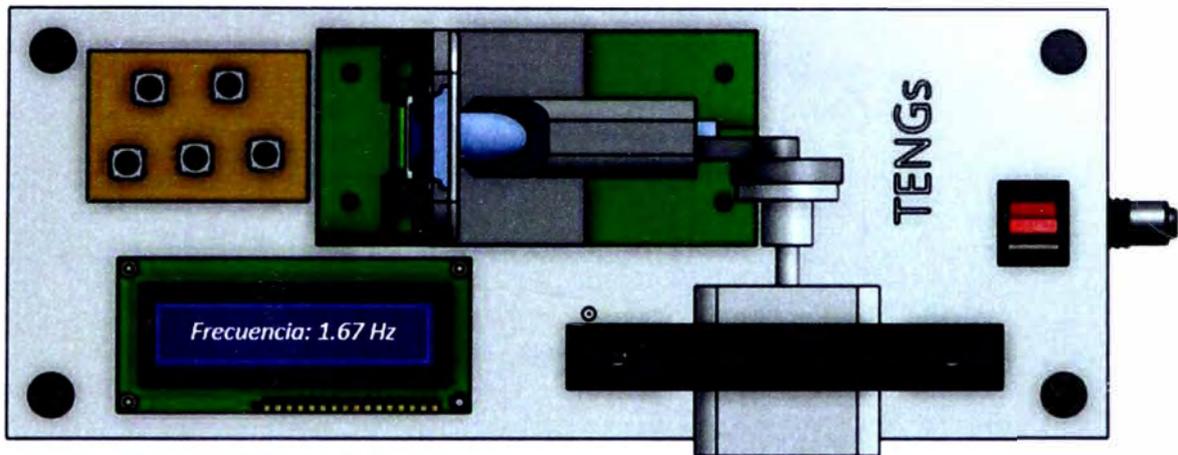


Figura 30. Encendido general.

3.4. Caracterización morfológica de las películas de Dragon Skin

La caracterización morfológica de las películas de Dragon Skin y Ecoflex fueron realizadas con ayuda de un equipo AFM (por sus siglas en inglés Atomic Force Microscopy) marca NT-MDT, modelo NTEGRA II. El ensayo fue realizado en modo semicontacto a una humedad relativa de 53% y una temperatura ambiental de 21°C. Para el estudio de la estructura molecular se usó un difractómetro de la marca Bruker D8 Advance. El ensayo fue realizado por 15 minutos a 40 kV y 20 mA y un ángulo 2θ de barrido de 5° a 70° con un paso de 0.02°.



Figura 31. Equipo AFM marca NT-MDT, modelo NTEGRA II (izquierda). Difractómetro de la marca Bruker D8 Advance(derecha).

3.5. Modelo analítico para nanogeneradores triboeléctricos

Para este caso se usa el modelo del campo eléctrico dependiente de la distancia, para lo cual se asume que el medio está compuesto de diferentes materiales dieléctricos que contienen tribocargas. El medio compuesto contiene dos electrodos de cargas libres.

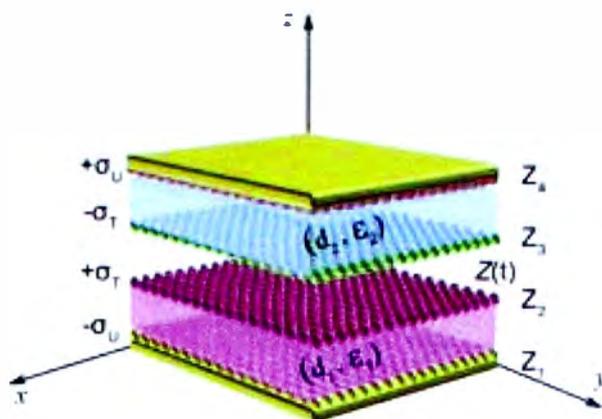


Figura 32. Ilustración esquemática de un sistema de coordenadas para un modo de Nanogenerador triboeléctrico en modo de separación por contacto.

Este modelo está basado en la ecuación de Maxwell-Poisson, la cual es:

$$\nabla \cdot D = \rho(r), \quad (14)$$

Donde ρ es la densidad de carga compuesta de cargas libres en la superficie de los electrodos y las tribocargas en el medio. Para resolver esta ecuación, una solución integral para el potencial eléctrico (Φ) en un material dieléctrico α es:

$$\Phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_\alpha} \int \frac{\rho(r')}{|r - r'|} dV \quad (15)$$

Donde ϵ_α representa la permitividad del medio dieléctrico. Este es el punto de inicio del modelamiento de los Nanogeneradores Triboeléctricos (TENGs). El potencial eléctrico para un punto arbitrario $r = (x, y, z)$ es (Shao, Willatzen, & Wang, 2020):

$$\Phi(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{4\pi\epsilon(r)} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{dx' dy'}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}} \quad (16)$$

Esta ecuación es usada para calcular el potencial eléctrico en un modelo matemático en 3D.

Para el campo eléctrico, de la ecuación anterior, se deriva:

$$E(x, y, z) = -\nabla \cdot \Phi$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{4\pi\epsilon(r)} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{dx' dy'}{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \frac{(x - x', y - y', z - z')}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}} \quad (17)$$

Donde $\epsilon_\alpha = \epsilon(r)$. Por las consideraciones de simetría, E_x y E_y desaparecen sobre la integración de x' y y' . Por lo cual el componente del campo eléctrico en la dirección z es:

$$E_z(0,0, z) = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i(z - z')}{4\pi\epsilon(r)} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{dx' dy'}{(x'^2 + y'^2 + (z - z')^2)^{3/2}} \quad (18)$$

Cuando los planos cargados se mueven con una baja frecuencia ocurre un cambio total del campo eléctrico. En otras palabras, el modelo electrostático cambia a un modelo cuasi-electrostático.

Cuando una carga es conectada entre los dos electrodos, las cargas se transfieren de un electrodo a otro para reducir la diferencia de potencial. En el sistema se tienen 4 cargas en el modo de contacto simple para el dispositivo TENG, lo que permite describir un campo eléctrico en la posición z :

$$\begin{aligned}
 E_z(0,0,z) &= -\frac{\sigma_U}{\pi\varepsilon(z)} \left(\frac{ab}{4(z-z_1)\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + (z-z_1)^2}} \right) \\
 &+ \frac{\sigma_T}{\pi\varepsilon(z)} \left(\frac{ab}{4(z-z_2)\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + (z-z_2)^2}} \right) \\
 &- \frac{\sigma_T}{\pi\varepsilon(z)} \left(\frac{ab}{4(z-z_3)\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + (z-z_3)^2}} \right) \\
 &+ \frac{\sigma_U}{\pi\varepsilon(z)} \left(\frac{ab}{4(z-z_4)\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + (z-z_4)^2}} \right),
 \end{aligned} \tag{19}$$

Donde σ_T y σ_U representa la densidad de tribocargas y la densidad de cargas transferidas entre los dos electrodos, respectivamente; y $\varepsilon(z)$ es la permitividad en la posición z . Usando esta ecuación, el campo eléctrico dentro del gap de aire, el dieléctrico 1 y el dieléctrico 2 puede ser calculado.

Considerando una capa triboeléctrica cargada σ , en un espacio libre con una permitividad de ε_0 , el campo eléctrico perpendicular a la capa E_z es:

$$\phi_a = -\frac{\sigma_U}{\pi\varepsilon_a} \int_0^{x_a+z+x_b} f(x)dx + \frac{\sigma_T}{\pi\varepsilon_a} \int_{x_a}^{x_a+z} f(x)dx \tag{20}$$

$$\phi_b = \frac{\sigma_U}{\pi\varepsilon_b} \int_0^{x_a+z+x_b} f(x)dx - \frac{\sigma_T}{\pi\varepsilon_b} \int_{x_b}^{z+x_b} f(x)dx \tag{21}$$

Para ver el detalle de esta solución mostrada antes puede revisar el anexo AA. Y podemos encontrar la solución a esta ecuación para un voltaje de circuito abierto para cuando el dieléctrico es un cuadrado de ancho W y espesor x_1 , el cual es:

$$\phi_1(x) = \frac{\sigma_T}{\pi \varepsilon_1} \left[x \arctan \left(\frac{w}{2x \sqrt{\frac{4x^2}{w^2} + 2}} \right) - \frac{w}{2} \ln \ln \left(\frac{\sqrt{\frac{4x^2}{w^2} + 2} + 1}{\sqrt{\frac{4x^2}{w^2} + 2} - 1} \right) \right]_{x_1}^{x_1+z} \quad (22)$$

Y

$$\phi_2(x) = \frac{\sigma_T}{\pi \varepsilon_2} \left[x \arctan \left(\frac{w}{2x \sqrt{\frac{4x^2}{w^2} + 2}} \right) - \frac{w}{2} \ln \ln \left(\frac{\sqrt{\frac{4x^2}{w^2} + 2} + 1}{\sqrt{\frac{4x^2}{w^2} + 2} - 1} \right) \right]_{x_2}^{x_2+z} \quad (23)$$

En un circuito abierto σ_U es cero, ya que no hay transferencia de cargas entre los electrodos.

CAPITULO IV. DESARROLLO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Dispositivo de caracterización TENGs

Este dispositivo permite medir y visualizar el valor de la fuerza de contacto. Además, fue diseñado y fabricado con la capacidad de caracterizar espesores de films que van desde las centenas de micras hasta las primeras unidades de milímetros. Este equipo al ser fabricado de PLA y acrílico sumado a su diseño estructural presentó una robustez que permite tener valores más confiables en cada ensayo de medida de salida eléctrica.

El dispositivo se puede visualizar en la plataforma de diseño CAD online Onshape, cuyo link es:

https://cad.onshape.com/documents/1c459161b86508492af2084c/w/3e67ea0ae33524c50c356032/e/2dd57456a637df3ef3246d85?renderMode=0&uiState=64dd4dc4b8d6cf5b8b5aee_d2

El dispositivo está compuesto de las siguientes partes:

- Fuente de alimentación: la fuente de alimentación del dispositivo es de 12V DC
- Motor a pasos NEMA 17: se trata de un motor a pasos bipolares con un paso de 1.8 grados y una corriente nominal de 1.5 A por fase.
- Driver TB6560: es un controlador para motores a pasos que permite una regulación precisa de la velocidad y el sentido de giro del motor.
- Sistema biela-manivela: el sistema biela-manivela se utiliza para generar el contacto entre las películas.
- Conector a Arduino: el dispositivo tiene una conexión a Arduino para leer la fuerza en tiempo real mientras los materiales en el TENG hacen contacto.
- Medida de pulsos de voltaje: son generados por los materiales en el TENG y este se mide en un osciloscopio.
- Medición de la Fuerza: el dispositivo, mediante un sensor FSR402, puede medir y leer la fuerza al momento de que los materiales en el TENG hacen contacto.
- Pantalla LCD 16x2: el dispositivo está equipado con una pantalla LCD 16x2 para mostrar la mayor fuerza medida y la frecuencia de contactos establecida.

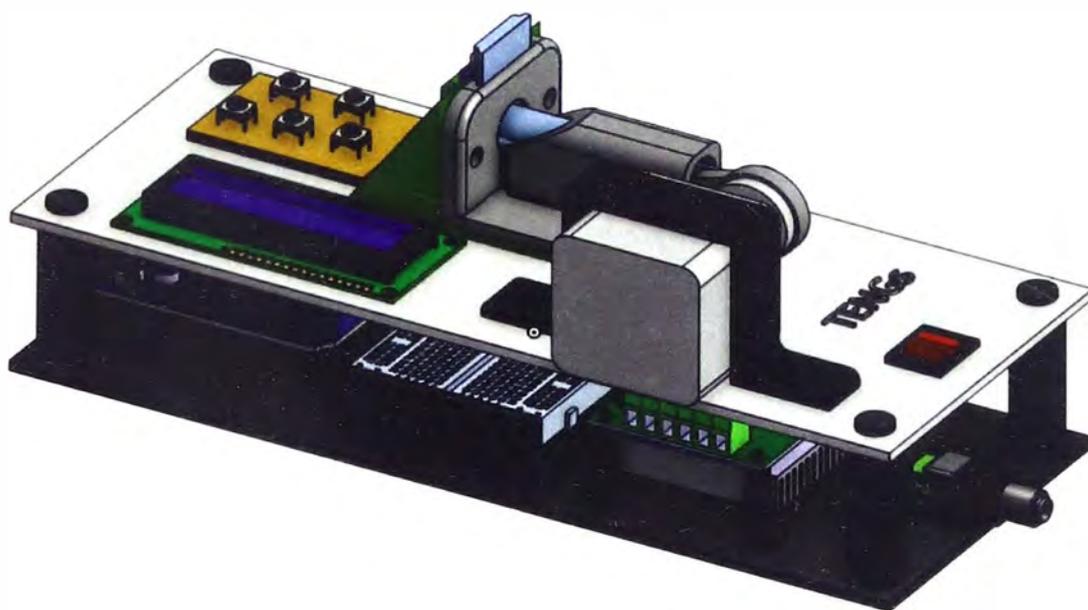


Figura 33. Modelado 3D del equipo TENGs.

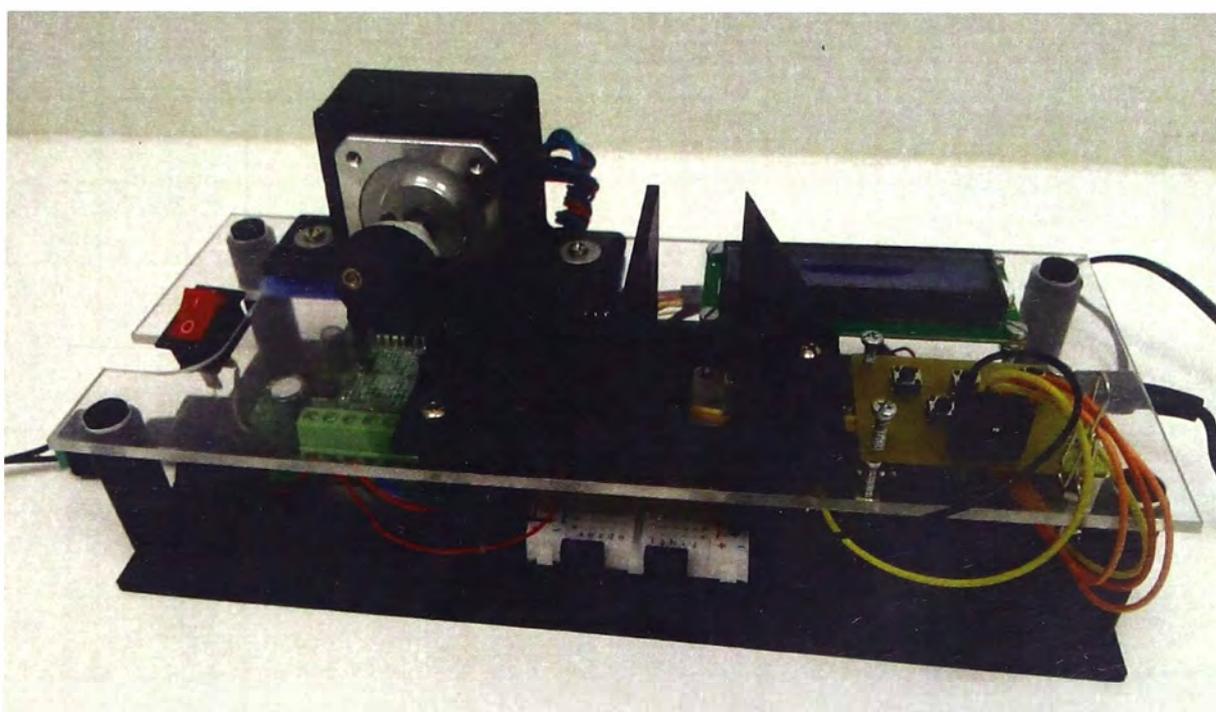


Figura 34. Equipo TENGs fabricado.

Este sistema cuenta con un compartimento donde se le agrega la película a estudiar y por otro lado cuenta con una superficie para sujetar el electrodo. El sistema tiene la capacidad de cambiar a tres tipos de frecuencias de valores: 1.67 Hz, 2.67 Hz y 3.33 Hz.

4.2. Películas y superficies de Silicona Ecoflex

Se fabricaron películas de silicona Ecoflex y Dragon Skin de diferentes espesores, ver Tablas 4 y 5. El área fue de 20mm x 20mm y las medidas mostradas son un promedio de tomas en 4 puntos sobre la superficie. El espesor de las películas fue medido con ayuda del micrómetro digital EC-770S 0-2000 um/lum resultando los siguientes valores:

Tabla 4. Espesores de películas de Silicona-Ecoflex..

ítem	Código	Espesor-modelo(um)	Espesor -fabricado (um)	Variación (%)
1	1E	200	167	16.5%
2	2E	300	283	5.7%
3	3E	400	477	19.3%
4	5E	600	559	6.8%
5	7E	800	801	0.1%
6	8E	900	900	0.0%
7	9E	1000	1020	2.0%
8	10E	1250	1322	5.8%
9	11E	1500	1514	0.9%
10	12E	1750	1768	1.0%
11	13E	2000	1884	5.8%

Tabla 5. Espesores de películas de Silicona-Dragon Skin.

ítem	Código	Espesor-modelo(um)	Espesor -fabricado (um)	Variación (%)
1	1D	400	412	3.0%
2	3D	600	678	13.0%
3	4D	700	843	20.4%
4	6D	900	1030	14.4%
5	7D	1000	1300	30.0%
6	9D	1500	1350	10.0%
7	10D	1750	1886	7.8%
8	11D	2000	2010	0.5%

Se observa que la película de ítem 3 de la Tabla 4 tiene una mayor variación en la medida de espesor entre lo modelado y lo fabricado, siendo este valor de 19.3 %. Y para la Tabla 5, el ítem 7 presenta una mayor variación de medida entre lo diseñado y lo fabricado, siendo este valor de 30%. Para el Ecoflex los principales retos para generar las películas es su tensión superficial ya que es complicado generar películas continuas sobre toda la superficie, una muestra de ello es que se forman vacíos en la superficie o huecos en la superficie si se desea conseguir espesores de alrededor de las 100 micras o menos. Para el Dragon Skin la dificultad de tener espesores más delgados que las 400 micras es debido a su alta viscosidad, lo cual impide que este se fluya por toda la superficie.



Figura 35. Medición de películas de 900 micras para película de Ecoflex 0030.

Para el desarrollo de los agujeros de las películas se imprimió en 3D el modelo diseñado para que se generen películas con agujeros de diámetros 1, 1.2, 1.4 y 1.6 mm distribuidos sobre toda la superficie. La impresión 3D se realizó en material PLA (Ácido poliláctico) y se fabricó con un espesor entre capas de 0.2mm y una velocidad de impresión de 50mm/s. Luego se vierte la silicona Dragon Skin sobre la superficie del molde impreso y se deja al ambiente por un espacio de 2 horas, tiempo que toma la polimerización de la película. La impresión se puede observar en la Figura 36.

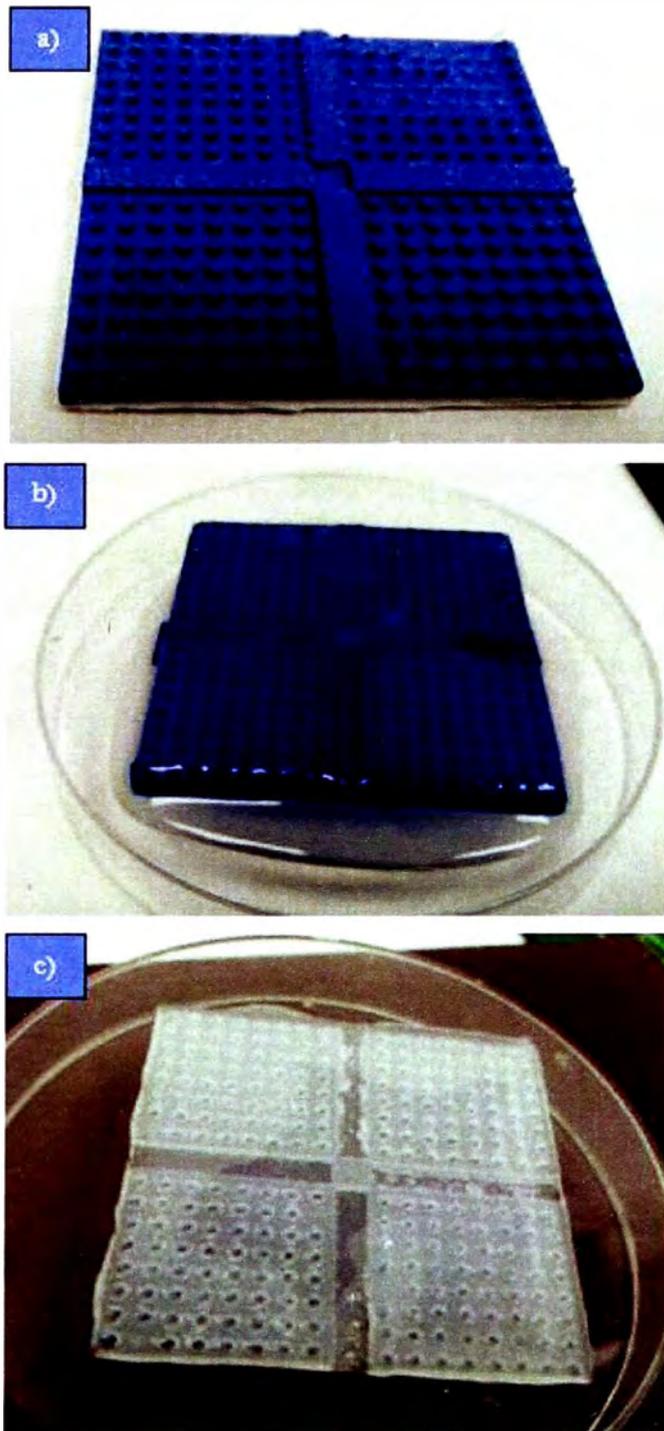


Figura 36. Proceso de fabricación de las películas con agujeros. a) Modelo impreso en 3D, b) Dragon skin sobre el molde de silicona, c) Silicona solidificado con los patrones de agujeros de diferentes diámetros.

Tabla 6. Films de entre 1 a 2 mm de espesor con diferentes porosidades.

Ítems	Diámetro (µm)	Espesor de la película (mm)
1	1000	1.25
2	1200	1.56
3	1400	1.67
4	1600	1.54

De la Tabla 6 se observa que la variación en el espesor de las películas es de entre 1.25 mm a 1.54 mm. Cabe resaltar que la medición de estos espesores se hizo en 5 puntos distribuidos sobre la superficie de las películas. Se observa que los espesores de las películas están dentro del rango de trabajo previamente (1 a 2 mm).

4.3. Caracterización eléctrica de las películas de Silicona Ecoflex y Dragon Skin

Para la medición de la salida de voltaje, se registraron los voltajes alcanzados para diferentes frecuencias: f_1 , f_2 y f_3 . Donde estas tienen los valores de: 1.67 Hz, 2.67 Hz y 3.33 Hz respectivamente.

4.3.1. Caracterización eléctrica del Ecoflex

Tabla 7. Voltajes de salida(V) para cada espesor de las películas de Ecoflex variando la frecuencia y registrando la fuerza de contacto en Newton.

ítem	Código	Espesor (um)	Vf1 (Volt.)	F1 (N)	Vf2(Volt)	F2 (N)	Vf3(Volt)	F3 (N)
1	1E	167	3.32	4.07	4.26	4.05	4.73	4.07
2	2E	283	3.83	3.95	4.8	3.95	3.59	3.95
3	3E	477	4.48	3.92	6.31	3.96	7.29	3.96
4	5E	559	4.34	3.78	6.2	3.8	7.23	3.95
5	7E	801	4.71	4.05	6.08	4.06	6.84	4.07
6	8E	900	4.98	4.24	6.55	4.28	7.37	4.28
7	9E	1020	3.91	4.23	4.93	4.26	5.49	4.24
8	10E	1322	1.8	4.08	2.03	4.01	2.27	4.01
9	11E	1514	1.59	4.01	2.21	3.99	2.51	3.96
10	12E	1768	1.82	4.26	2.39	4.31	2.77	4.3
11	13E	1884	1.64	4.06	2.04	4.07	2.52	4.13

De la Tabla 7 podemos notar que el mayor voltaje es de 4.71 V para un espesor de 801 um y una frecuencia de 1.67 Hz. Para una frecuencia de 2.67 Hz tenemos un voltaje máximo de 6.55 V para un espesor de 900 um y para una frecuencia de 3.33Hz se consigue un voltaje de 7.37 V para un espesor de 900 um. Con respecto a las fuerzas registradas podemos notar que la fuerza oscila alrededor de los 4N para las 3 frecuencias de trabajo en todo el rango de espesores estudiados.

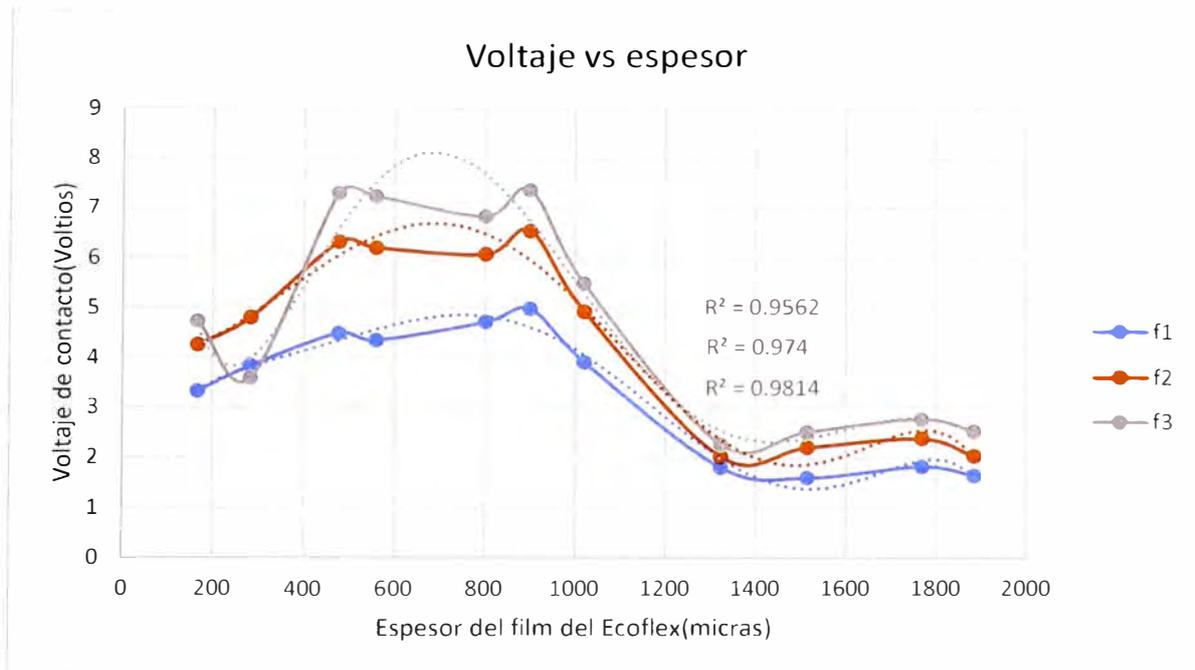


Figura 37. Variación de Voltaje (Voltios) para cada espesor de película (en micras) de Ecoflex para frecuencias de f1, f2 y f3.

Según la Figura 37 podemos observar que hay una zona donde el voltaje aumenta a medida que aumenta el espesor de la película de Ecoflex, lo cual se da entre los 167 um hasta un espesor de alrededor de 700 micras. Y luego el voltaje empieza a disminuir hasta un espesor de alrededor de 1300 micras. A partir de las 1300 micras el voltaje no cambia significativamente hasta un espesor de 1884 micras. Estas tendencias se mantienen para los tres tipos de frecuencias de contacto. Si bien es cierto las tendencias son similares, se ve mayores valores de voltaje a medida que aumenta la frecuencia de contacto. Esta influencia se observa con mayor influencia en el rango de los 400 a las 1200 micras, luego, para espesores mayores esta influencia se va atenuando.

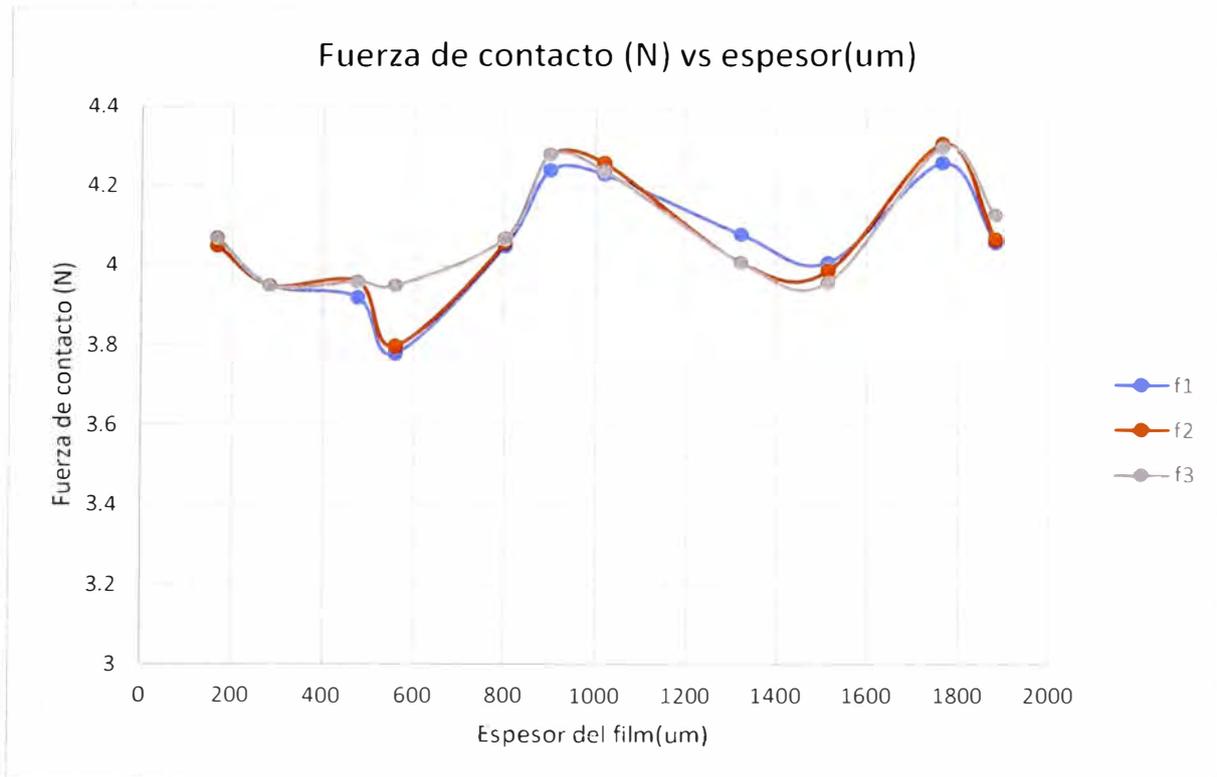


Figura 38. Variación de la fuerza de contacto al variar el espesor de la película del Ecoflex-0030.

La Figura 38 es producto de las lecturas del sensor de fuerza observadas en la pantalla del equipo de caracterización eléctrica desarrollado en el presente trabajo. Se puede observar que la fuerza de contacto oscila entre los 3.8N a 4.3 N aproximadamente. Presentando un cambio de 0.5 N aproximadamente. El promedio de las fuerzas de contacto es de alrededor 4 N con una variación aproximada de $\pm 5\%$. Con respecto a la frecuencia de contacto se puede observar que esta no influye significativamente en el cambio de tendencia de la fuerza de contacto a medida que el espesor de la película (Ecoflex-0030) incrementa.

Podemos observar que la tendencia a disminuir del voltaje a medida que aumenta el espesor del dieléctrico está relacionada con la literatura, pero la aparente tendencia inicial a aumentar no es más que una disminución debido a la tensión de ruptura dieléctrica eléctrica (Breakdown voltage). Además, podemos observar que, al aumentar el espesor, el espacio de contacto disminuye, y la fuerza de contacto no sufre un gran cambio debido a la alta capacidad de deformación del Ecoflex (alrededor del 900% antes de su rotura).

Considerando la hoja técnica del fabricante, tenemos como datos que el Ecoflex presenta una deformación del 900% a los 200 psi. En el ensayo tenemos una fuerza aproximada de

4N en un área de 4×10^{-4} , lo cual hace un aproximado de 10 kPa (1.45psi). Extrapolando estos datos para estimar el porcentaje de deformación podemos mencionar que el sistema presenta una deformación de aproximadamente 6.52%. Con este valor y aplicando la teoría de los fonones y la deformación de un material para la capacidad triboeléctrica podríamos estimar variaciones de voltaje de 0.3V, lo cual está dentro del margen de variación de medida mostrados en la Figura 37. Por lo cual la influencia de la deformación del material no presenta una influencia significativa.

4.3.2. Caracterización eléctrica del Dragón Skin

Tabla 8. Voltajes de salida(V) para cada espesor de películas de Dragon Skin variando la frecuencia y registrando la fuerza de contacto en Newton.

ítem	Código	Espesor(um)	Vf1(Volt)	F1 (N)	Vf2(Volt)	F2 (N)	Vf3(Volt)	F3 (N)
1	1D	412	2.49	3.25	2.87	3.36	3.3	3.5
2	3D	678	2.06	3.45	2.62	3.54	2.89	3.47
3	4D	843	1.88	3.75	2.34	3.76	2.74	3.75
4	6D	1030	1.75	3.89	2.22	3.9	2.4	3.9
5	7D	1300	1.83	3.88	2.25	3.92	2.65	3.87
6	9D	1350	1.96	3.9	2.39	3.9	2.65	3.91
7	10D	1886	1.74	4.09	2.35	4.09	2.66	4.09
8	11D	2010	1.74	4.3	2.12	4.23	2.49	4.27

De la Tabla 8 podemos notar que el mayor voltaje es de 2.49 V para un espesor de 412 um y una frecuencia de 1.67 Hz. Para una frecuencia de 2.67 Hz tenemos un voltaje máximo de 2.87.V para un espesor de 412 um y para una frecuencia de 3.33Hz se consigue un voltaje de 3.3 V para un espesor de 412 um. Con respecto a las fuerzas registradas podemos notar que la fuerza oscila alrededor de los 3 a 4N para las 3 frecuencias de trabajo en todo el rango de espesores estudiados.

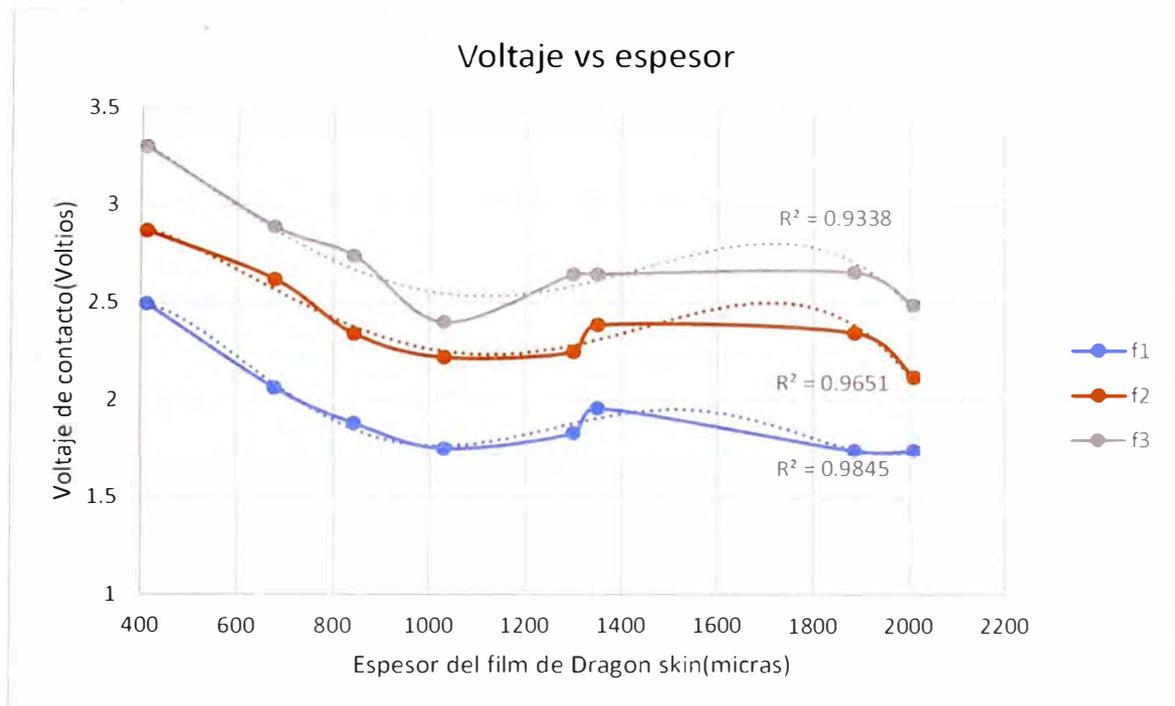


Figura 39. Variación de Voltaje para cada espesor de películas de Dragon Skin para frecuencias de f1, f2 y f3.

Según la Figura 39 podemos observar que hay una tendencia donde el voltaje disminuye a medida que disminuye el espesor de las películas de Dragon skin, lo cual se da entre los 412 um hasta un espesor de alrededor de 2010 micras. Estas tendencias se mantienen para los tres tipos de frecuencias. Si bien es cierto las tendencias son similares, se ven mayores valores de voltaje a medida que aumenta la frecuencia de contacto.

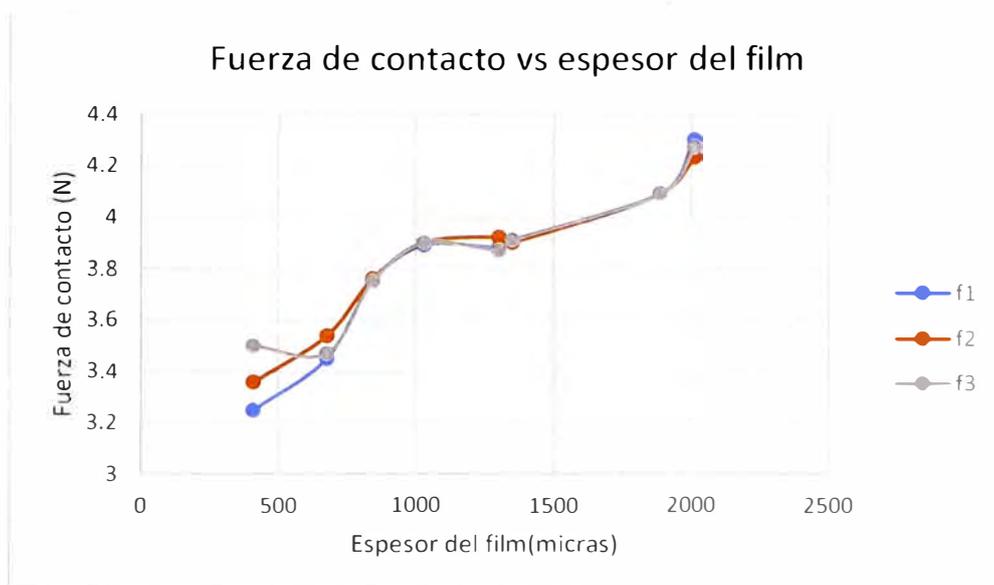


Figura 40. Variación de la fuerza de contacto al variar el espesor de películas del Dragon skin.

La Figura 40 es producto de las lecturas del sensor de fuerza observadas en la pantalla del equipo de caracterización eléctrica desarrollado en el presente trabajo. Se puede observar que la fuerza de contacto oscila entre los 3.3N a 4.3 N aproximadamente. Presentando un cambio de 1 N aproximadamente. El promedio de las fuerzas de contacto es de alrededor 3.8 N con una variación aproximada de $\pm 14\%$. Con respecto a la frecuencia de contacto se puede observar que esta no influencia significativamente en el cambio de tendencia de la fuerza de contacto a medida que el espesor de películas (Dragon Skin-0030) incrementa.

Para el caso del Dragon Skin se puede notar que la influencia a disminuir el voltaje se mantiene desde el inicio, la cual es de alrededor las 400 micras. Esto concuerda con lo descrito en la literatura para el fenómeno de inducción triboeléctrica. En este caso no observamos la tensión de ruptura dieléctrica eléctrica (Breakdown voltage), esto posiblemente es ya que las medidas de espesores de dieléctrico son mayores a las registradas para el Ecoflex. Por otro lado, podemos notar que, al aumentar el espesor, el espacio de contacto disminuye, y la fuerza de contacto aumenta desde los 3.3N hasta los 4.3 N aproximadamente, en este caso se observan mayores variaciones debido a que la capacidad de deformación del Dragon Skin es menor con respecto al Ecoflex. (alrededor del 634% antes de su rotura).

Considerando la hoja técnica del fabricante, tenemos como datos que el Dragon Skin-0030 presenta una deformación del 634% a los 500 psi. En el ensayo tenemos una fuerza aproximada de 3.8N ± 0.5 N en un área de 4×10^{-4} , lo cual hace un aproximado de 9.5kPa (1.38psi). Extrapolando estos datos para estimar el porcentaje de deformación podemos mencionar que el sistema presenta una deformación de aproximadamente 1.75%. Con este valor y aplicando la teoría de los fonones y la influencia de la deformación de un material para la capacidad triboeléctrica podríamos estimar variaciones de voltaje de 0.05V, lo cual está dentro del margen de variación de medida mostrados en la Figura 17. Por lo cual la influencia de la deformación del material no presenta una influencia significativa.

4.3.3. Influencia del área en la salida de voltaje

Tabla 9. Voltaje de salida para cada diámetro de la porosidad de películas de Dragon Skin para un espesor de entre 1.25 a 1.54 micras.

ítem	Diámetro de agujero (um)	Espesor(mm)	Voltaje (V)-f1	Voltaje (V)-f2	Voltaje (V)-f3
1	1000	1.25	1.32	1.4	1.51
2	1200	1.56	1.3	1.42	1.54
3	1400	1.67	1.29	1.35	1.4
4	1600	1.54	1.3	1.35	1.36

De la Tabla 9 podemos notar que hay una tendencia de disminución de voltaje a medida que aumenta el diámetro del agujero, esta disminución se ve más marcada para las frecuencias de trabajo f2 y f3. Si bien es cierto las tendencias son similares, se ve un incremento de voltaje a medida que aumenta la frecuencia de contacto.

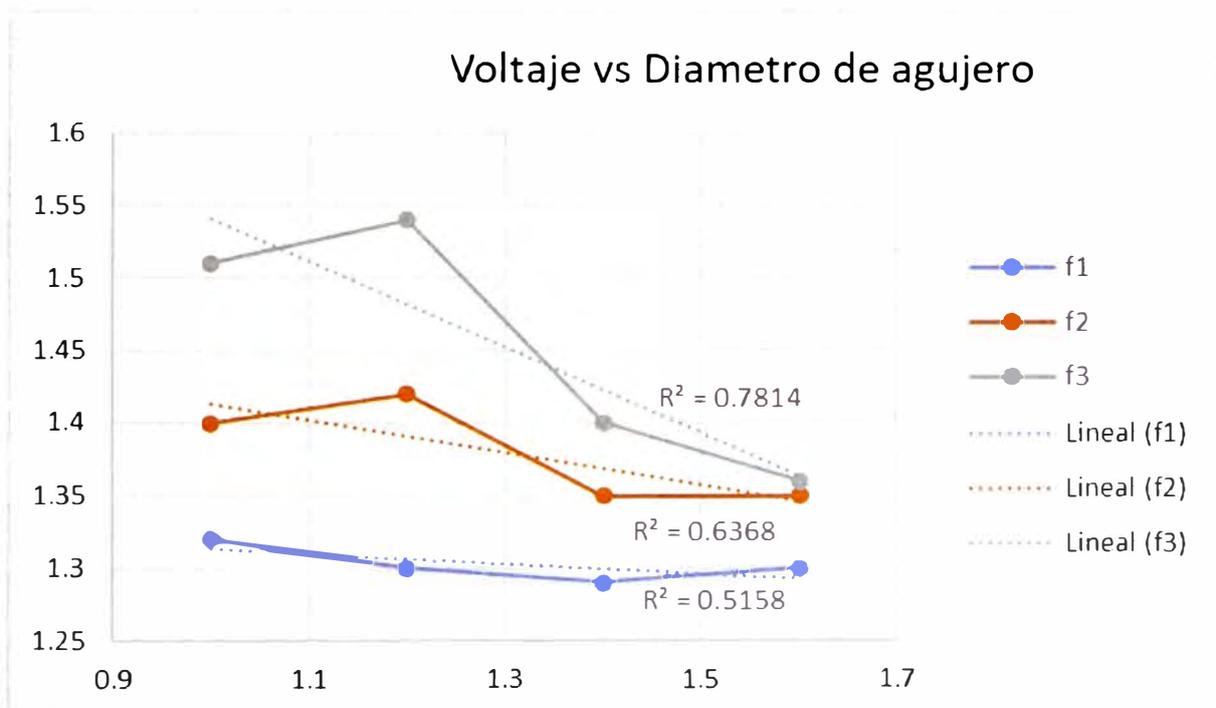


Figura 41. Variación de Voltaje para cada diámetro de agujero para películas de Dragon Skin para frecuencias de f1, f2 y f3.

De la Figura 17. Podemos observar la tendencia a disminuir del voltaje a medida que aumenta el diámetro del agujero, además de ello vemos que la razón con la cual disminuye es más crítica para mayores frecuencias.

Se encontró un mayor espesor de película para un diámetro de poro de 1.4mm, este valor de espesor es de 1.67 mm. Para el caso de películas con agujeros, el valor de los espesores varió entre 1.25 a 1.67 micras, al variar el espesor del film podría haber influenciado en los valores de salida voltaje, pero podemos notar que para unos diámetros de poro de 1.2 y 1.6 mm los espesores son muy similares, estos son 1.54 y 1.56 mm, respectivamente, y se observa una variación en el voltaje de salida. Finalmente podemos mencionar que al observar la salida de voltaje para estas películas se evidencia la influencia del área superficial en la salida de voltaje.

4.4. Caracterización de las películas de Ecoflex y Dragon Skin

Para caracterizar las películas usamos AFM y DRX. Del ensayo de AFM obtenemos los valores de la raíz cuadrada media de la rugosidad de la superficie (Rrms) tanto para el Ecoflex como el Dragon skin y estos valores son mostrados en la Tabla 10. El Ecoflex produce una rugosidad superficial (Rrms) de 317.7, la cual es mayor que el Dragon Skin, 256.6. Por otro lado, se observa que el Ecoflex presenta una ligera área superficial mayor que el Dragon Skin. De la Figura 42, se puede observar la morfología tridimensional de películas de Ecoflex y Dragon Skin. Se puede observar que el Ecoflex presenta una altura de mayor deformación superficial llegando hasta 1 micra, sin embargo, en el Dragon Skin tenemos deformaciones del orden de las décimas de micras llegando hasta los 0.6 um. Además, se puede observar que las deformaciones superficiales del Ecoflex son mayores a diferencia del Dragon Skin donde las deformaciones son más localizadas.

Tabla 10. Análisis de AFM de valores de Rrms.

Material	Rrms (nm)	Área de la superficie(μm^2)
Dragon Skin	256.6	135.2
Ecoflex	317.7	136.5

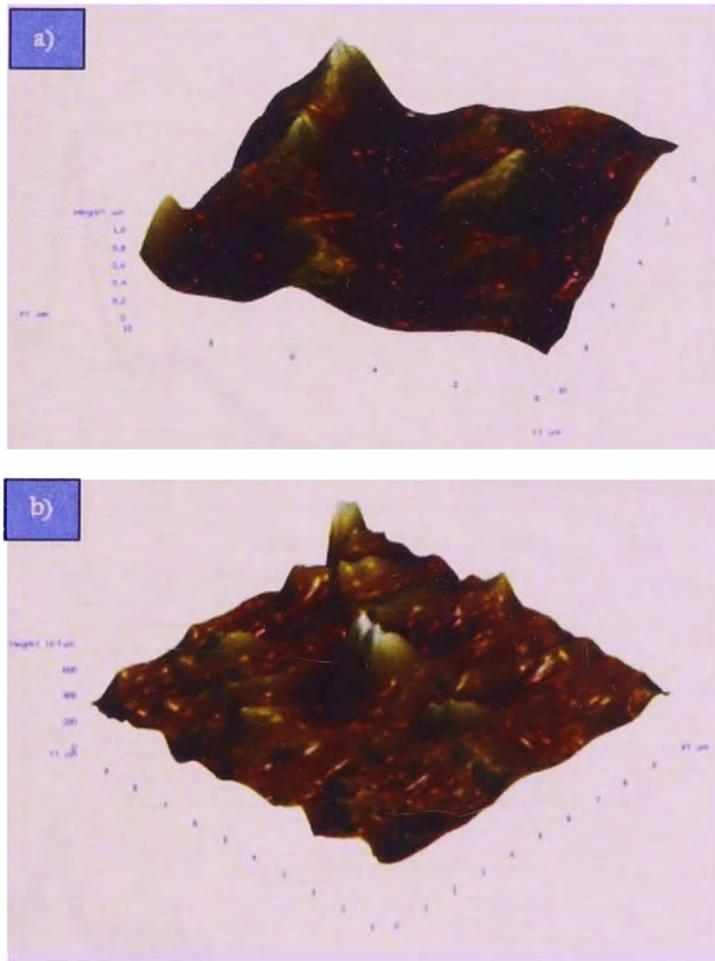


Figura 42. Resultados AFM para películas de Dragon Skin(a) y Ecoflex(b).

Para cuantificar el grado de cristalinidad se empleó un análisis de Difracción de rayos X de películas de Dragon Skin y Ecoflex. De donde se observa en la Figura 43 que existen picos en alrededor de los 12° para ambas muestras, estas parecen destacar sobre una zona amorfa. Los resultados muestran que los materiales tienen un comportamiento semicristiano similar. Otro punto para observar es que el Dragon Skin presenta un mayor ruido, lo cual se puede apreciar en la Figura 43b.

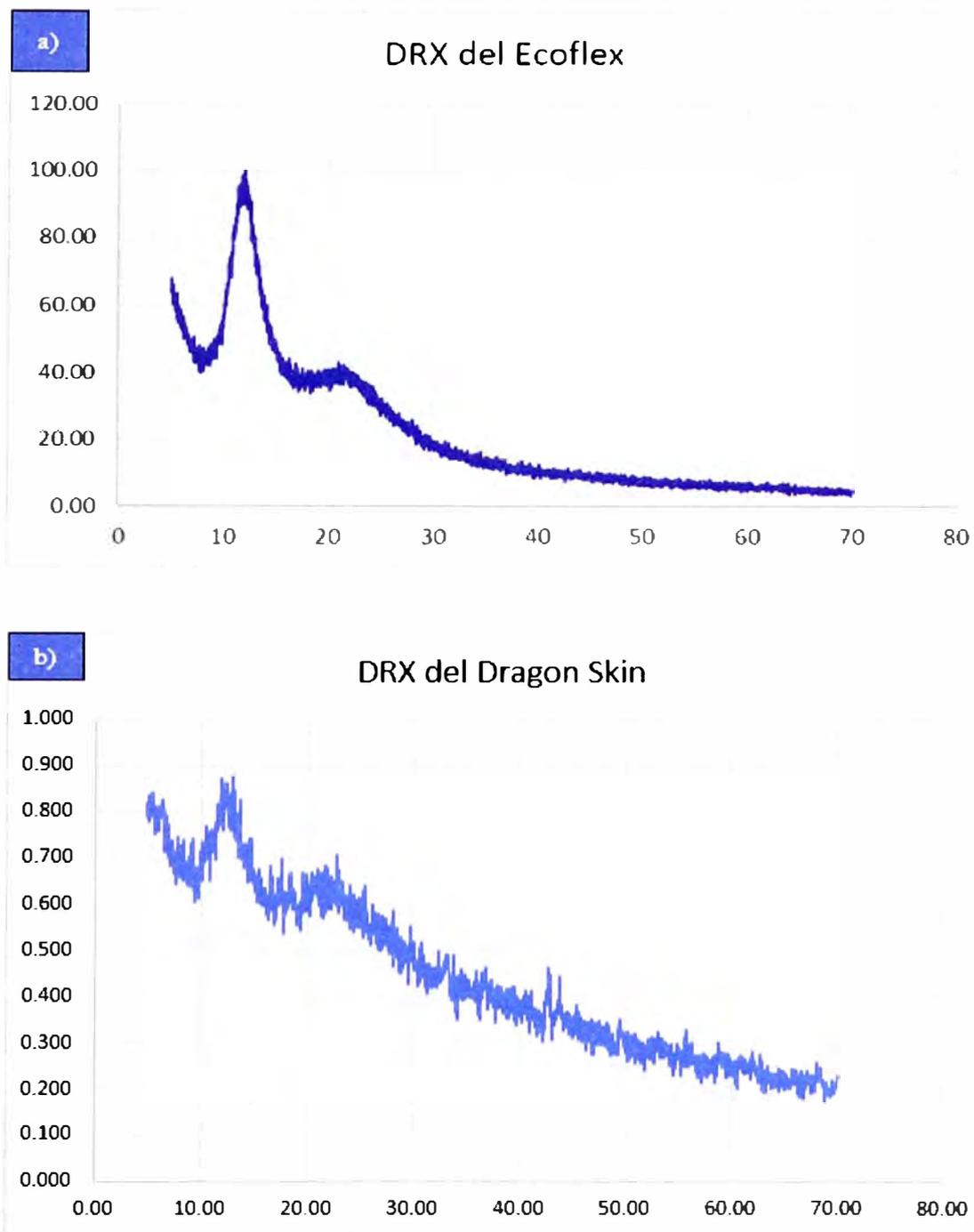


Figura 43. Resultados de DXR para film de Ecoflex(a) y Dragon Skin(b).

Con respecto a la caracterización de AFM se observan valores de rugosidad superficial R_{rms} de 256.6nm y 317.7 nm para el Dragon Skin y para el Ecoflex respectivamente. Esto podría ser una de las razones por la cual el Ecoflex tiene mejores capacidades triboeléctricas en comparación con el Dragon Skin incluso cuando ambos tienen muy similar área superficial, 135.2 μm^2 y 136.5 μm^2 para el Dragon Skin y Ecoflex respectivamente. Con respecto a los

ensayos de DRX podemos notar que ambos, Ecoflex y Dragon Skin, presentan una similar estructura semicristalina alcanzando un pico alrededor de los 12°. Por lo cual, la diferencia entre capacidad triboeléctrica entre el Ecoflex y el Dragon Skin no se ve influenciada por su estructura cristalina. Podemos concluir que el Ecoflex tiene mejores propiedades triboeléctricas que el Dragon Skin si tomamos en cuenta parámetros como espesor de películas, frecuencia de contacto y morfología de superficie.

Debido a que se encontró mejores propiedades triboeléctricas en el Ecoflex, se investigó la influencia del espesor del dieléctrico (Ecoflex) en la salida eléctrica de voltaje abierto de un Nanogenerador Triboeléctrico usando métodos analíticos presentados en el fundamento teórico, y estos fueron resueltos usando el software de análisis numérico en la nube Octave.

4.5. Resultados analíticos de nanogeneradores triboeléctricos

El objetivo del estudio es analizar la salida de voltaje en circuito abierto. Este es uno de los parámetros principales para determinar el rendimiento de un triboeléctrico. Considerando la distancia de separación entre los dieléctricos que entran en contacto igual a z y sus unidades en m.

Las dimensiones de la configuración del modelo se pueden observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Dimensiones de las capas que conforman el TENG propuesto.

Nombre	Longitud(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)
Electrodo 1	20	20	0.012
Electrodo 2	20	20	0.012
dieléctrico	20	20	$d=0.1, 0.3, 0.732, 1.5, 1.8.$

Para estimar la densidad superficial eléctrica sobre el dieléctrico luego del proceso de triboelectrificación se empleó datos experimentales, como el voltaje pico registrado experimentalmente para cada frecuencia de trabajo. Este punto fue tomado como promedio de los valores registrados en la meseta alcanzada de la gráfica voltaje vs espesor, estos

valores están comprendidos entre medidas de espesor de aproximadamente 477 μm a 900 μm . Estos valores promedios para cada frecuencia se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros adicionales para el modelamiento del TENG en modo contacto simple propuesto.

Nombre	Valor	unidad
Voltaje pico alcanzado experimentalmente, V_{f1}	4.63	Volt.
Voltaje pico alcanzado experimentalmente, V_{f2}	6.23	Volt.
Voltaje pico alcanzado experimentalmente, V_{f3}	7.19	Volt.
Máxima distancia de separación(z)	0.005	m

Adicional a ello se muestran las propiedades de los materiales empleados en el experimento, estos datos se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Propiedades de los materiales.

Nombre	Material	Constante dieléctrica
Electrodo 1 y 2	Aluminio	$\epsilon_{1,2} = 10.8$
Dieléctrico	Ecoflex	$\epsilon_{1,2} = 2.8$

Tomando estos valores y usando las ecuaciones 22 y 23 podemos resolverlas usando el software de cálculo numérico en la nube Octave. Los resultados de voltaje para cada espesor se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparativa de resultados de voltaje con respecto al espesor del Ecoflex.

Espesor (um)	Voltaje f1(Volts)	Voltaje f2(Volts)	Voltaje f3(Volts)
167	2.457	3.306	3.815
283	2.449	3.295	3.803
477	2.436	3.278	3.783
559	2.431	3.271	3.775
801	2.415	3.249	3.751
900	2.409	3.241	3.740
1020	2.401	3.231	3.729
1322	2.382	3.205	3.699
1514	2.371	3.189	3.681
1768	2.355	3.169	3.657
1884	2.348	3.159	3.646

La tabla 14 muestra la variación del voltaje entre los electrodos a medida que aumenta el espesor del dieléctrico, en este caso el Ecoflex 0030.

Vemos que la Figura 44 muestra una tendencia a disminuir a medida que aumenta el espesor del dieléctrico. Además, de la Figura 45, vemos que el voltaje aumenta a medida que aumenta la distancia de separación entre el dieléctrico y el Ecoflex. Esta tendencia a aumentar decae levemente a medida que la distancia aumenta y también tiende a disminuir a medida que el espesor del dieléctrico aumenta. Por otro lado, la gráfica 22 muestra la comparación entre los resultados experimentales y computacionales para resultados de voltaje a medida que varía el espesor del dieléctrico. Se observa que ambas gráficas se acercan para espesores de alrededor de 700 a 800 micras, sin embargo, hay una ligera caída para espesores menores, esto se puede deber a la ionización del aire y la consecuente disminución de la constante dieléctrica del aire, lo cual hace que disminuya el campo eléctrico. Por otro lado, hay una tendencia a la disminución del voltaje para espesores mayores a 800 micras tanto para los resultados experimentales como los computacionales, pero hay una mayor tendencia en los resultados experimentales. Esto puede deberse a que las medidas experimentales se realizaron con un osciloscopio, el cual tiene baja impedancia.

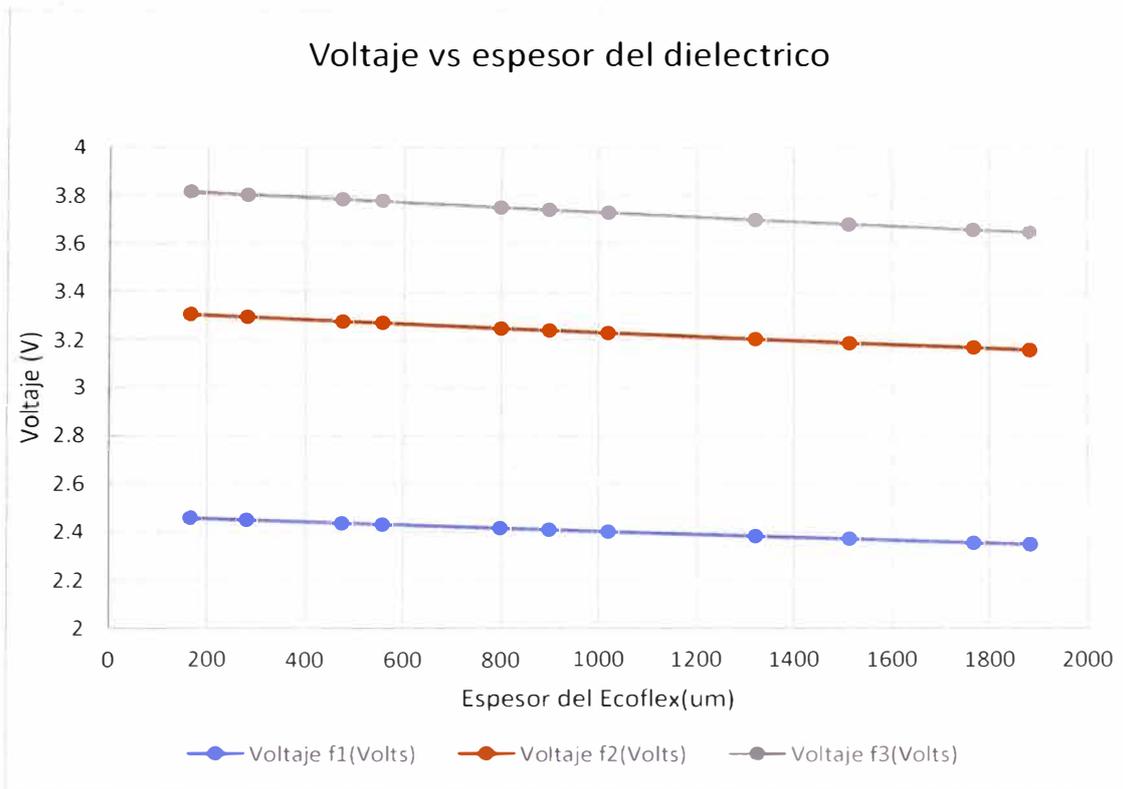


Figura 44. Variación de voltaje para espesores de dieléctrico (Ecoflex).

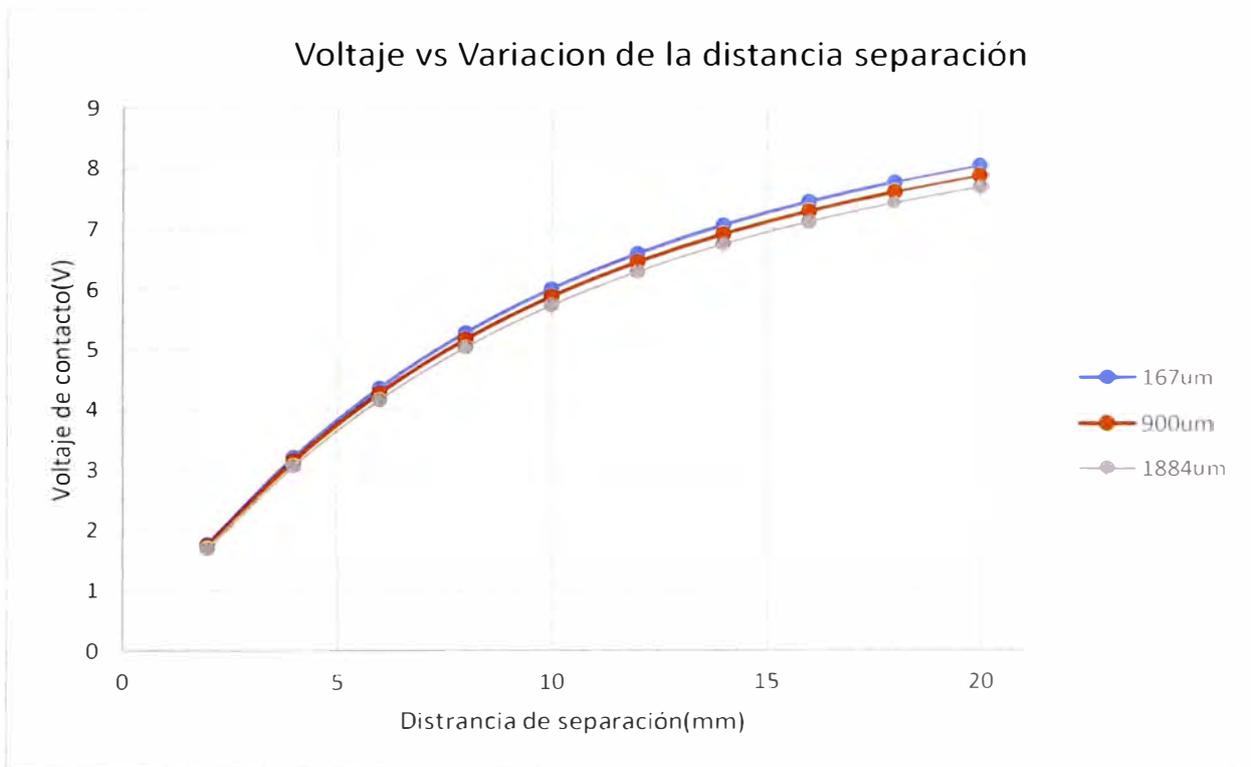


Figura 45. Variación de voltaje con respecto a la distancia de separación entre el electrodo y el dieléctrico.

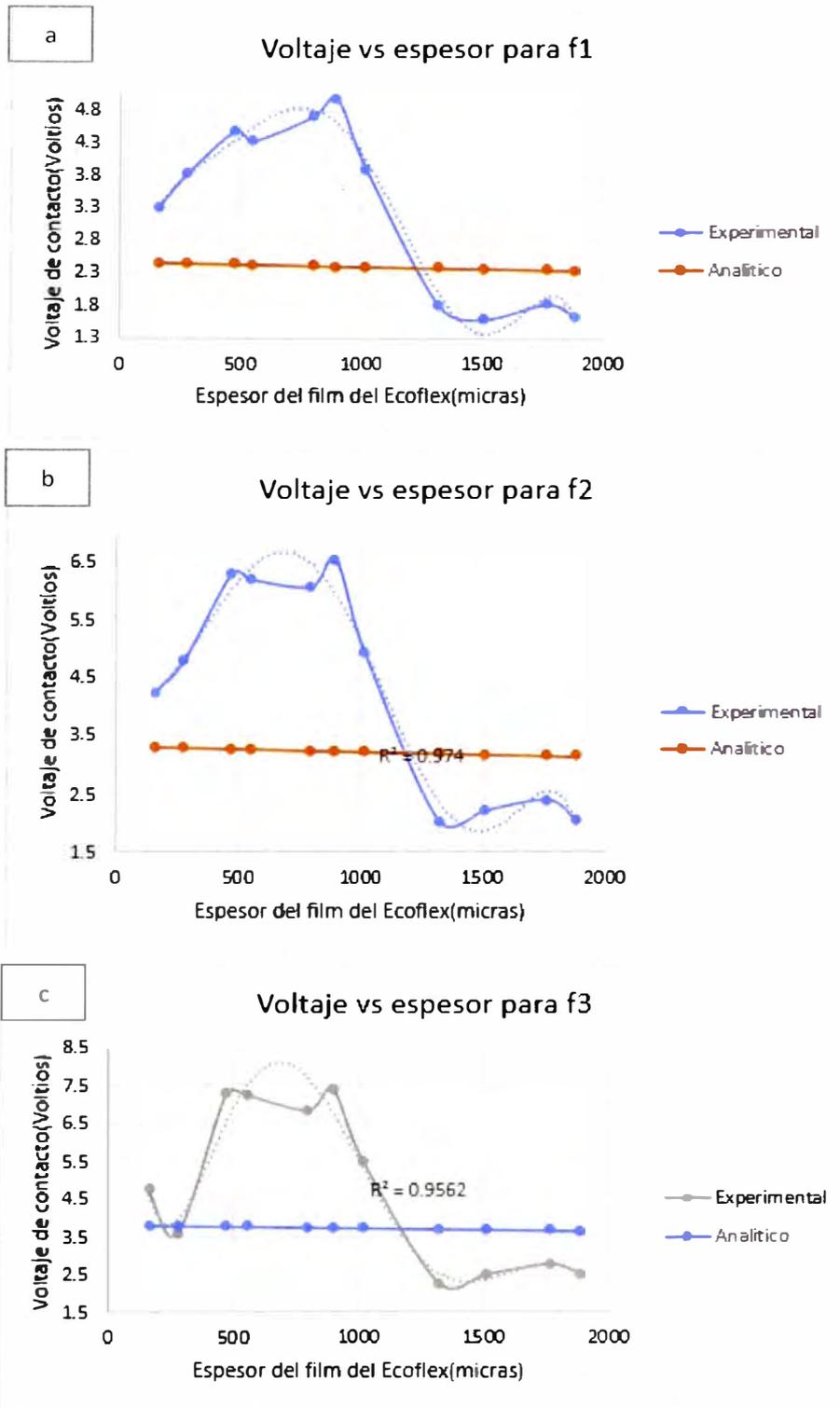


Figura 46. Variación de voltaje con respecto al espesor del dieléctrico experimental y computacionalmente para las frecuencias 1(a), 2(b),3(c).

CONCLUSIONES

Se desarrolló un dispositivo portátil y de bajo costo de caracterización eléctrica para nanogeneradores triboeléctricos en modo de contacto simple, el cual permite medir la salida de voltaje variando el parámetro frecuencia en tres rangos: 1.67 Hz, 2.67 Hz y 3.33 Hz mientras se registre la fuerza de contacto.

Con respecto a las películas de Ecoflex y Dragon Skin, se fabricó medidas del orden de entre las 167 a 1884 micras y 412 a 2010 micras, respectivamente. Se pudo conseguir menores espesores con el Ecoflex debido a que esta silicona es menos viscosa que el Dragon Skin. Con respecto a la variación del área superficial, se fabricaron películas de Dragon Skin con porosidades del orden de 1, 1.2, 1.4 y 1.6 mm.

Para caracterizar las películas se usó el equipo fabricado TENGs, un AFM, y un Difractómetro de Rayos X. Con el equipo TENGs se observa para el Ecoflex y una frecuencia de contacto de 3.33Hz se nota una tendencia aproximada creciente de salida de voltaje, de alrededor de los 4V a 8V, entre los 100 a 700 micras y una tendencia decreciente, de 8V a 2.5V, para las 700 micras hasta las 1880 micras. Esto evidencia un espesor óptimo para el cual los nanogeneradores podrían aprovechar mejor su capacidad de transformar energía. Para el Dragon Skin se observa una tendencia a la disminución del voltaje de salida con respecto al aumento del espesor. Esto podría indicar que el espesor óptimo para el Dragon Skin está por debajo de las 400 micras. Por otro lado, observamos que las películas con poros de 1.2mm y 1.6mm, los cuales tienen espesores de 1.56 y 1.57 mm, tienen cambios en la salida de voltaje más significativos para la frecuencia 3, esto podría ser debido a que al aumentar el diámetro del poro disminuye el área de contacto, por lo cual disminuye la capacidad de transferir cargas entre sus superficies. Con respecto a la caracterización de AFM se observan valores de rugosidad superficial R_{rms} de 256.6 nm y 317.7 nm para el Dragon Skin y para el Ecoflex respectivamente. Esto podría ser una de las razones por la cual el Ecoflex tiene mejores capacidades triboeléctricas en comparación con el Dragon Skin incluso cuando ambos tienen muy similar área superficial, 135.2 μm^2 y 136.5 μm^2 para el Dragon Skin y Ecoflex respectivamente. Con respecto a los ensayos de DRX podemos notar que ambos, Ecoflex y Dragon Skin, presentan una similar estructura semicristalina alcanzando un pico alrededor de los 12°. Por lo cual, la diferencia entre capacidad

triboeléctrica entre el Ecoflex y el Dragon Skin no se ve influenciada por su estructura cristalina. Podemos concluir que el Ecoflex tiene mejores propiedades triboeléctricas que el Dragon Skin si tomamos en cuenta parámetros como espesor de la película, frecuencia de contacto y morfología de superficie.

Debido a que se encontró mejores propiedades triboeléctricas en el Ecoflex, se investigó la influencia del espesor del dieléctrico (Ecoflex) en la salida eléctrica de voltaje abierto de un Nanogenerador Triboeléctrico usando ecuaciones analíticas que fueron evaluadas usando el software online Octave. Se puede observar la tendencia a disminuir del voltaje a medida que aumenta el espesor del dieléctrico, lo cual está acorde a los resultados experimentales. Las mayores magnitudes experimentales observadas podrían deberse al instrumento de medida, el cual tiene baja impedancia. Para espesores de alrededor de las 100 micras, la tendencia experimental y analítica no coinciden. Esto puede deberse a que experimentalmente está sucediendo una rotura del campo eléctrico. Además, se estudió la influencia de la distancia de contacto en la salida de voltaje. De esta se puede observar que cerca a los 2 cm el voltaje llega a un límite.

REFERENCIAS

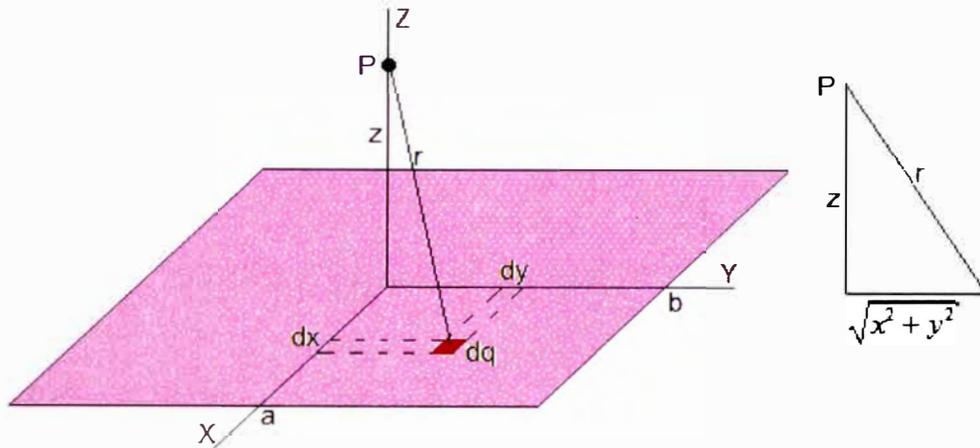
- Fan, F.-R., Tian, Z.-Q., & Wang, Z. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 328-334.
- Ahmadi, M. H., Ghazvini, M., Nazari, M. A., Ahmadi, M. A., Pourfayaz, F., Lorenzini, G., & Ming, T. (2018). Renewable energy harvesting with the application of nanotechnology: A review. *International Journal of Energy Research*, 1387-1410.
- Andrea Bunaciu, Elena Gabriela Udristioiu, & Hassan Y. Aboul-Enein. (2015). X-Ray diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*(45), 289-299.
- Arief, I., Zimmermann, P., Hait, S., Park, H., Ghosh, A., Janke, A., . . . Das, A. (2022). Elastomeric microwell-based triboelectric nanogenerators by in situ simultaneous transfer-printing. *Materials Horizons*, 1468-1478.
- Ccorahua, R., Huaroto, J., Luyo, C., Quintana, M., & Vela, E. (2019). Enhanced-performance bio-triboelectric nanogenerator based on starch polymer electrolyte obtained by a cleanroom-free processing method. *Nano Energy*, 610-618.
- Dharmasena, R., Jayawardena, K., Mills, C., Dorey, R., & Silva, S. (2018). A unified theoretical model for Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy*, 391-400.
- Dharmasena, R., Jayawardena, K., Mills, C., Deane, J., Anguita, J., Dorey, R., & Silva, R. (2017). Triboelectric nanogenerators: providing a fundamental framework. *Energy & Environmental Science* .
- Dominique Bazin, Elise Boudierlique, Michel Daudon, Vincent Frochot, Jean-Philippe Haymann, Emmanuel Letavernier, . . . Raphaël Weil. (9 de agosto de 2021). Scanning electron microscopy—a powerful imaging technique for the clinician. *Microcrystalline pathologies: Clinical issues and nanochemistry / Pathologies microcristallines : questions cliniques et nanochimie*, 25, 37-60.
- Duque, M., & Murillo, G. (2022). Tapping-Actuated Triboelectric Nanogenerator with Surface Charge Density Optimization for Human Motion Energy Harvesting. *Nanomaterials*, 3271.
- Guo, J. (2018). Scanning Probe Microscopy. En J. Guo, *High Resolution Imaging, Spectroscopy and Nuclear Quantum Effects of Interfacial Water* (págs. 23–41). Singapore: Springer Link.
- Ha, J., Chung, J., Kim, S., Kim, J., Shin, S., Park, J., . . . Kim, J.-B. (2017). Transfer-

- printable micropatterned fluoropolymer-based triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 126-133.
- Lone, S., Lim, K., Kaswan, K., Chatterjee, S., Fan, K.-P., Choi, D., . . . Lin, Z.-H. (2022). Recent advancements for improving the performance of triboelectric nanogenerator devices. *Nano Energy*, 107318.
- Lyu, Y., & Wang, Y. (2022). Output optimization of biodegradable triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 107811.
- Mule, A., Dudem, B., & Yu, J. (2018). High-performance and cost-effective triboelectric nanogenerators by sandpaper-assisted micropatterned polytetrafluoroethylene. *Energy*, 677-684.
- Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112111.
- Pan, S., & Zhang, Z. (2019). Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. *Friction*, 2-17.
- Pan, S., & Zhang, Z. (2017). Triboelectric effect: A new perspective on electron transfer process. *Journal of Applied Physics*.
- Pang, Y., Zhu, X., Jin, Y., Yang, Z., Liu, S., Shen, L., . . . Lee, C. (2023). Textile-inspired triboelectric nanogenerator as intelligent pavement energy harvester and self-powered skid resistance sensor. *Applied Energy*, 121515.
- Prada, T., Harnchana, V., Lakhonchai, A., Chingsungnoen, A., Poolcharuansin, P., Chanlek, N., . . . Amornkitbamrung, V. (2021). Enhancement of output power density in a modified polytetrafluoroethylene surface using a sequential O₂/Ar plasma etching for triboelectric nanogenerator applications. *Nano Research*, 272–279.
- Rahimi Sardo, F., Rayegani, A., Nazar, A. M., Balaghiinaloo, M., Saberian, M., Mohsan, H. S., . . . Cho, H.-S. (2022). Recent Progress of Triboelectric Nanogenerators for Biomedical Sensors: From Design to Application. *MDPI*, 697.
- Ren, Z., Wu, L., Pang, Y., Zhang, W., & Yang, R. (2022). Strategies for effectively harvesting wind energy based on triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 107522.
- Shao, J., Willatzen, M., & Wang, Z. (2020). Theoretical modeling of triboelectric nanogenerators (TENGs). *Journal of Applied Physics*, 111101.
- Shi, L., Dong, S., Ding, P., Chen, J., Liu, S., Huang, S., . . . Luo, J. (2019). Carbon

- electrodes enable flat surface PDMS and PA6 triboelectric nanogenerators to achieve significantly enhanced triboelectric performance. *Nano Energy*, 548-557.
- Wang, C., Shi, Q., & Lee, C. (2022). Advanced Implantable Biomedical Devices Enabled by Triboelectric Nanogenerators. *Nanomaterials*, 1366.
- Wang, N., Liu, Y., Ye, E., Li, Z., & Wang, D. (2021). Control methods and applications of interface contact electrification of triboelectric nanogenerators: a review. *Materials Research Letters*, 97-123.
- Wang, Z. (2017). On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators. *Materials Today*, 74-82.
- Wen, J., He, H., Niu, C., Rong, M., Huang, Y., & Wu, Y. (2022). An improved equivalent capacitance model of the triboelectric nanogenerator incorporating its surface roughness. *Nano Energy*, 107070.
- Zhang, R., & Olin, H. (2020). Material choices for triboelectric nanogenerators: A critical review. *EcoMat*, e12062.
- Zhong, Y., Wang, J., Han, L., Dai, S., Zhu, H., Hua, J., . . . Ding, J. (2023). High-performance flexible self-powered triboelectric pressure sensor based on chemically modified micropatterned PDMS film. *Sensors and Actuators A: Physical*, 114013.
- Zhu, G., Pan, C., Guo, W., Chen, C.-Y., Yusheng, Z., Ruomeng, Y., & Lin Wang, Z. (2012). Triboelectric-Generator-Driven Pulse Electrodeposition for Micropatterning. *Nano Letters*, 4960-4965.

ANEXOS

A. Solución analítica para el campo eléctrico en un punto fuerza de una sección rectangular cargada uniformemente



El potencial en P producido por la carga dq situada en el punto (x, y) de la placa es

$$dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dx \cdot dy}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

Donde σ es la densidad de carga constante en C/m^2

El potencial en el punto P producido por la placa rectangular es

$$V(z) = \frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{dx \cdot dy}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

Cálculo del potencial $V(z)$

Integramos primero respecto de y , calculamos la integral

$$\int_{-b}^b \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

que es una función de x .

Esta integral es inmediata del tipo,

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \ln \left(x + \sqrt{x^2 + a^2} \right)$$

En nuestro caso, x es y y $a^2 = x^2 + z^2$

$$\int_{-b}^b \frac{dy}{\sqrt{y^2 + (x^2 + z^2)}} = \ln \left(y + \sqrt{y^2 + x^2 + z^2} \right) \Big|_{-b}^b = \ln \left(\frac{\sqrt{b^2 + x^2 + z^2} + b}{\sqrt{b^2 + x^2 + z^2} - b} \right)$$

Ahora queda resolver la integral

$$V(z) = \frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0} \int_{-a}^a \ln \left(\frac{\sqrt{b^2 + x^2 + z^2} + b}{\sqrt{b^2 + x^2 + z^2} - b} \right) dx =$$

$$\frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \int_{-a}^a \ln \left(\sqrt{b^2 + x^2 + z^2} + b \right) dx - \int_{-a}^a \ln \left(\sqrt{b^2 + x^2 + z^2} - b \right) dx \right\}$$

Hay que seguir los pasos

- Integramos por partes cada una de las dos integrales

$$\int \ln \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} + b \right) dx \begin{cases} u = \ln \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} + b \right), & du = \frac{x \cdot dx}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} + b \right)} \\ dv = dx, & v = x \end{cases}$$

$$= x \ln \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} + b \right) - \int \frac{x^2 \cdot dx}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} + b \right)}$$

Del mismo modo, se calcula la segunda integral

$$\int \ln \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} - b \right) dx = x \ln \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} - b \right) - \int \frac{x^2 \cdot dx}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} - b \right)}$$

Los límites de la integral son $-a$ y a . El potencial es

$$V(z) = \frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0} \left\{ 2a \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} - b} \right) - \int_{-a}^a \frac{x^2 \cdot dx}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} + b \right)} + \int_{-a}^a \frac{x^2 \cdot dx}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} - b \right)} \right\}$$

- Descomponemos las fracciones integrando en suma de dos fracciones

$$\frac{x^2}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} + b \right)} = \frac{x^2}{x^2 + z^2} - b \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}}$$

$$\frac{x^2}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \left(\sqrt{x^2 + b^2 + z^2} - b \right)} = \frac{x^2}{x^2 + z^2} + b \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}}$$

El potencial es

$$V(z) = \frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0} \left\{ 2a \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} - b} \right) - \int_{-a}^a \frac{x^2}{x^2 + z^2} dx + b \int_{-a}^a \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} dx + \int_{-a}^a \frac{x^2}{x^2 + z^2} dx + b \int_{-a}^a \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} dx \right\} =$$

$$= \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} \left\{ a \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} - b} \right) + b \int_{-a}^a \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} dx \right\}$$

- Descomponemos la fracción integrando en suma de dos fracciones

$$\frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} - \frac{z^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}}$$

- La integral de la primera fracción es inmediata

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} = \ln \left(x + \sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \right)$$

- La integral de la segunda fracción es más laboriosa

$$z^2 \int \frac{dx}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}}$$

Hacemos el cambio de variable,

$$x = \sqrt{b^2 + z^2} \tan t$$

$$dx = \sqrt{b^2 + z^2} \frac{dt}{\cos^2 t}$$

Teniendo en cuenta la relación trigonométrica

$$1 + \tan^2 t = \frac{1}{\cos^2 t}$$

Llegamos a la expresión

$$z^2 \int \frac{\cos t \cdot dt}{z^2 + b^2 \sin^2 t}$$

Hacemos un nuevo cambio de variable, $u = \sin t$, $du = \cos t \cdot dt$

$$z^2 \int \frac{du}{z^2 + b^2 u^2} = \frac{z^2}{b^2} \int \frac{du}{u^2 + \frac{z^2}{b^2}}$$

que es de nuevo, una integral inmediata, del tipo

$$\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \arctan \left(\frac{x}{a} \right)$$

El resultado es

$$z^2 \int \frac{du}{z^2 + b^2 u^2} = \frac{z}{b} \arctan \left(\frac{bu}{z} \right)$$

Deshacemos los cambios

$$z^2 \int \frac{dx}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} = \frac{z}{b} \arctan \left(\frac{b}{z} u \right) = \frac{z}{b} \arctan \left(\frac{b}{z} \sin t \right) = \frac{z}{b} \arctan \left(\frac{b}{z} \sin \left(\arctan \left(\frac{x}{\sqrt{b^2 + z^2}} \right) \right) \right)$$

Teniendo en cuenta la relación trigonométrica

$$\sin \theta = \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$$

$$\arctan x = \theta, \quad \tan \theta = x$$

$$\sin(\arctan x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}$$

Obtenemos el resultado

$$z^2 \int \frac{dx}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} = \frac{z}{b} \arctan \left(\frac{b}{z} \frac{x}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} \right)$$

La integral buscada es la diferencia de dos términos

$$\int \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} dx = \ln \left(x + \sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \right) - \frac{z}{b} \arctan \left(\frac{b}{z} \frac{x}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} \right)$$

Los límites de integración son $-a$ y a

$$\int_{-a}^a \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} dx = \ln \left(x + \sqrt{x^2 + b^2 + z^2} \right) - \frac{z}{b} \arctan \left(\frac{b}{z} \frac{x}{\sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} \right) \Big|_{-a}^a = \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} + a}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} - a} \right) - \frac{2z}{b} \arctan \left(\frac{ab}{z\sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} \right)$$

El resultado final para el potencial $V(z)$ es

$$V(z) = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} \left\{ a \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} - b} \right) + b \int_{-a}^a \frac{x^2}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + b^2 + z^2}} \right\} = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} \left\{ a \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} - b} \right) + b \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} + a}{\sqrt{a^2 + b^2 + z^2} - a} \right) - 2z \arctan \left(\frac{ab}{z\sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} \right) \right\}$$

B. Código en Octave Online para resolver las ecuaciones analíticas de la inducción del campo eléctrico variando el espesor del dieléctrico.

```

ep=8.85*10^-12;W=0.02;V=4.63;ea=ep*2.8;eb=ep;
fA=zeros(1,11);
xa=[167 283 477 559 801 900 1020 1322 1514 1768 1884]*10^-
6;xb=0;z=0.005;D=V*ep/z;xaz=xa+z;
xbz=xb+z;
MM2=(4*xb^2/W^2+2)^0.5;
MM2z=(4*xbz^2/W^2+2)^0.5;
M2=xb*atan(W/(2*xb*MM2))-0.5*W*log((MM2+1)/(MM2-1));
M2z=xbz*atan(W/(2*xbz*MM2z))-0.5*W*log((MM2z+1)/(MM2z-
1));
MP2=M2z-M2;
fB=D*MP2/(pi*eb);
DifPotencial=zeros(1,11);
for i=1:11
    MM1=((4*xa(i)^2)/W^2+2)^0.5;
    M1=xa(i)*atan(W/(2*xa(i)*MM1))-
0.5*W*log((MM1+1)/(MM1-1));
    MM1z=((4*xaz(i)^2)/W^2+2)^0.5;
    M1z=xaz(i)*atan(W/(2*xaz(i)*MM1z))-
0.5*W*log((MM1z+1)/(MM1z-1));
    MP1=M1z-M1;
    fA(1,i)=D*MP1/(pi*ea);
    DifPotencial(1,i)=fA(1,i)+fB;
end
DifPotencial

```

C. Código en Octave Online para resolver las ecuaciones analíticas variando la distancia de separación de contacto.

```

ep=8.85*10^-12;W=0.02;V=7.19;ea=ep*2.8;eb=ep;
fA=zeros(1,11);
xa=[167 283 477 559 801 900 1020 1322 1514 1768 1884]*10^-
6;xb=0;

z=0.02;nz=10;
zi=z/nz;
fB=zeros(1,10);
DifPotencial=zeros(10,11);
for k=1:nz

```

```

zt=zi*k;
D=V*ep/0.005;
xaz=xa+zt;
xbz=xb+zt;
MM2=(4*xb^2/W^2+2)^0.5;
MM2z=(4*xbz^2/W^2+2)^0.5;
M2=xb*atan(W/(2*xb*MM2))-0.5*W*log((MM2+1)/(MM2-1));
M2z=xbz*atan(W/(2*xbz*MM2z))-0.5*W*log((MM2z+1)/(MM2z-
1));
MP2=M2z-M2;
fB(k)=D*MP2/(pi*eb);
for i=1:11
    MM1=((4*xa(i)^2)/W^2+2)^0.5;
    M1=xa(i)*atan(W/(2*xa(i)*MM1))-
0.5*W*log((MM1+1)/(MM1-1));
    MM1z=((4*xaz(i)^2)/W^2+2)^0.5;
    M1z=xaz(i)*atan(W/(2*xaz(i)*MM1z))-
0.5*W*log((MM1z+1)/(MM1z-1));
    MP1=M1z-M1;
    fA(1,i)=D*MP1/(pi*ea);
    DifPotencial(k,i)=fA(1,i)+fB(k);
end
end
DifPotencial

```