

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**FABRICACIÓN DE NANOGENERADORES
TRIBOELÉCTRICOS A PARTIR DE
BIOPOLÍMEROS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Adrián Isaac Urtecho Benites

ASESOR:

Fernando G. Torres, Ph.D.

Lima, 2023

Informe de Similitud

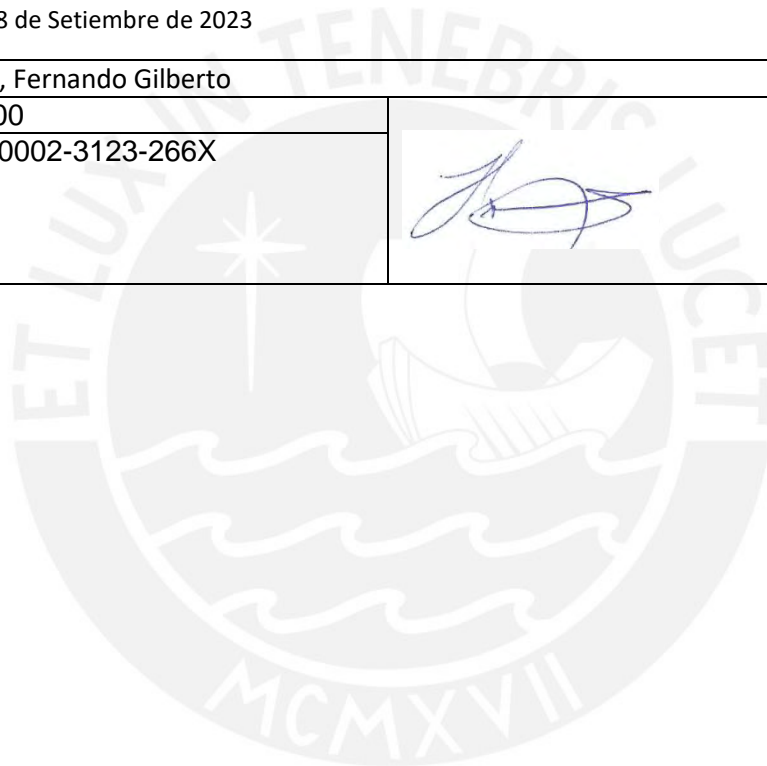
Yo, Fernando Gilberto Torres García, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulado FABRICACIÓN DE NANOGENERADORES TRIBOELÉCTRICOS A PARTIR DE BIOPOLÍMEROS del autor ADRIÁN ISAAC URTECHO BENITES.

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 9%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 18/05/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: 18 de Setiembre de 2023

Torres García, Fernando Gilberto	
DNI: 07879100	
ORCID: 0000-0002-3123-266X	



RESUMEN

En la búsqueda de fuentes de energía sostenibles y autónomas, los nanogeneradores triboeléctricos (TENGs) han surgido como dispositivos prometedores capaces de convertir la energía mecánica en electricidad. Estos dispositivos aprovechan el efecto triboeléctrico, que ocurre cuando dos materiales diferentes se frotan entre sí y generan cargas eléctricas, debido a esto es importante encontrar materiales apropiados para generar estas cargas.

Los biopolímeros como el almidón y carragenina, han ganado atención significativa como una alternativa prometedora a los polímeros sintéticos convencionales que se usan como superficies activas en forma de láminas para la fabricación de TENGs. Dichos biopolímeros se obtienen de fuentes naturales renovables, como algas, plantas y microorganismos. Además, los biopolímeros presentan propiedades únicas que los hacen altamente atractivos para su implementación en estos dispositivos.

La presente tesis se enfoca en la exploración de la fabricación de nanogeneradores triboeléctricos utilizando láminas triboeléctricas obtenidas de los biopolímeros carragenina, almidón, ulvan y los exopolisacáridos de cianobacterias. Para ello, primero se evaluó las propiedades mecánicas y químicas de las láminas de biopolímeros. Los resultados de las pruebas de tracción revelaron que los biopolímeros alcanzaron diferentes deformaciones y esfuerzos máximos en respuesta a la carga aplicada. La espectroscopia FTIR confirmó que los biopolímeros obtenidos correspondían a los esperados según el proceso de extracción realizado.

Después de evaluar las características iniciales de las láminas de biopolímeros, se desarrollaron prototipos de TENGs utilizando diferentes pares de láminas triboeléctricas. Se fabricaron ocho prototipos de TENGs combinando las láminas de biopolímeros con superficies de Kapton® y Teflón®. Se obtuvieron valores máximos de voltaje de 66.40 V en el par triboeléctrico de Teflón® (PFTE) + carragenina, mientras que el par triboeléctrico de kapton + ulvan generó el valor mínimo de 2.12 V. Estos resultados indican que los TENGs pueden generar suficiente voltaje para su aplicación en dispositivos electrónicos portátiles de bajo consumo, relacionados a LEDs, relojes o sensores. Los resultados obtenidos muestran el potencial de los TENGs basados en biopolímeros como una fuente de energía sostenible y autónoma.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Kiandra Benites y Miguel Urtecho, por su incondicional apoyo a lo largo de mi vida académica y profesional. Su amor, aliento y sacrificio han sido fundamentales en mi crecimiento y éxito. Siempre han estado ahí para brindarme su apoyo emocional y financiero, animándome a perseguir mis metas y sueños.

Al Dr. Fernando G. Torres, por la confianza y paciencia dada para realizar este trabajo y por su invaluable apoyo y orientación como asesor de mi tesis.

A los miembros del grupo POLYCOM, en especial a Karen, por su valioso apoyo y asesoría durante mi proyecto. Su generosidad al proporcionar acceso a los equipos del laboratorio de Polímeros y Bionanomateriales de la Sección Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, y su experiencia en el campo de los biopolímeros ha sido fundamental para el desarrollo de mi investigación.

Este trabajo fue financiado por CONCYTEC-PROCIENCIA en el marco del concurso “Proyectos de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico 2020-02” [Contrato N° 166-2020-FONDECYT], proyecto “Fabricación de un nanogenerador triboeléctrico biodegradable (bio - TENG) a partir de nanomateriales obtenidos de recursos renovables de la Sierra peruana”.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
INTRODUCCIÓN	10
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos	11
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	12
1.1. Efecto triboeléctrico.....	12
1.1.1. Parámetros importantes.....	15
1.1.2. Factores que influyen a la triboelectricidad	16
1.1.3. Serie triboeléctrica	16
1.2. Nanogeneradores triboeléctricos.....	17
1.2.1. Métodos de generación de energía.....	19
1.2.2. Aplicaciones de TENGs.....	20
1.3. Biopolímeros.....	22
1.3.1. Características y propiedades.....	22
1.3.2. Aplicaciones.....	23
1.3.3. Principales biopolímeros utilizados	26
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	29
2.1. Desarrollo de láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros	29
2.1.1. Materiales.....	29
2.1.2. Proceso de extracción de EPS a partir de <i>Nostoc commune</i>	30
2.1.3. Proceso de extracción de ulvan a partir de <i>Ulva Nematoida</i>	34
2.1.4. Proceso de extracción de carragenina a partir de algas rojas	35
2.1.5. Proceso de extracción de almidón a partir de papa	37
2.2. Fabricación de láminas de biopolímeros.....	39
2.2.1. Fabricación de láminas de EPS	39
2.2.2. Fabricación de láminas de ulvan	39
2.2.3. Fabricación de láminas de carragenina	40
2.2.4. Fabricación de láminas de almidón.....	41
2.3. Ensayos de tracción a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros	42
2.4. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros	42

2.5.	Fabricación de prototipos con láminas triboeléctricas sintéticas.....	43
2.6.	Fabricación de prototipos con láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros	46
2.6.1.	Tabla de prototipos.....	47
2.7.	Caracterización de prototipos.....	49
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		51
3.1.	Ensayos de tracción a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros	51
3.1.1.	Ensayo en láminas de carragenina	51
3.1.2.	Ensayo en láminas de Almidón.....	52
3.1.3.	Ensayo en láminas de EPS.....	53
3.1.4.	Ensayo en láminas de Ulvan	54
3.2.	Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros	56
3.2.1.	FTIR en láminas de carragenina	56
3.2.2.	FTIR en láminas de almidón.....	57
3.2.3.	FTIR en láminas de EPS.....	58
3.2.4.	FTIR en láminas de ulvan	59
3.3.	Voltaje en circuito abierto de nanogenerador triboeléctrico usando láminas sintéticas	60
3.4.	Voltaje en circuito abierto de nanogenerador triboeléctrico usando láminas basadas en biopolímeros	63
3.4.1.	Medición de Voltaje en picos.....	63
3.4.2.	Medición de Voltaje en el tiempo	72
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES		81
CAPÍTULO 5. Referencias bibliográficas.....		82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de materiales empleados para las láminas.....	29
Tabla 2: Tabla de prototipos de TENG con distintos recubrimientos.....	45
Tabla 3: Tabla de prototipos con láminas de Teflón® y láminas de biopolímeros.....	47
Tabla 4: Tabla de prototipos con láminas de Kapton® y láminas de biopolímeros.....	48
Tabla 5: Tabla de resultados de ensayos de tracción.....	55
Tabla 6: Tabla de prototipos con láminas sintéticas.....	62
Tabla 7: Resumen de resultados de medición de voltaje en picos.....	71
Tabla 8: Resumen de resultados de medición de voltaje en el tiempo.....	80



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1:</i> Esquema de 2 materiales en contacto en el que se muestra el intercambio de electrones en a) antes del contacto, b) en contacto, y c) después del contacto, mostrando la transferencia de electrones de un material al otro, cargando uno positivamente y otro negativamente. d) Liberación de carga del material	12
<i>Figura 2:</i> Ilustración de la máquina de Otto von Guericke. Fuente: Gerlier S. XIX	13
<i>Figura 3:</i> Un árbol de ideas para ilustrar la corriente de desplazamiento de Maxwell recién revisada: el primer término $\epsilon\partial E/\partial t$ es responsable de la teoría de las ondas electromagnéticas; y el término recién añadido debido a $\partial P_s/\partial t$ son las aplicaciones de las ecuaciones de Maxwell en energía y sensores, que son los nanogeneradores	14
<i>Figura 4:</i> Serie triboeléctrica cualitativa adaptado de “ <i>Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review</i> ”	17
<i>Figura 5:</i> (a) Imagen representativa del prototipo de Wang (b) Mecanismo de TENG propuesto por Wang.	18
<i>Figura 6:</i> Los cuatro modos fundamentales de los TENG: (a) modo de contacto-separación vertical, (b) modo de frotación-deslizamiento lateral, (c) modo de electrodo simple y (d) modo de capa triboeléctrica independiente	19
<i>Figura 7:</i> Los TENG como sensores de presión autoalimentados. (a) Mecanismos de detección de presión del sensor de alta resolución. (b) El dispositivo en un dedo humano detecta la presión a través de la punta de acero. (c) Los conjuntos de TENG detectan la información de la presión aplicada. (d) Curva de trayectoria táctil de la punta medida. (e) Diagrama esquemático del TENG autorrecuperable. (f) TENG utilizado para detectar la presión al pisar una bomba de aire.	20
<i>Figura 8:</i> (a) Diagrama esquemático del TENG fabricado. (b) Vista transversal de la TENG fabricado. (c) Vista superior de la TENG fabricado. (d) Fotografías del TENG en movimiento tomadas con una cámara de alta velocidad.....	21
<i>Figura 9:</i> Clasificación de los polímeros según su origen y biodegradabilidad.	22
<i>Figura 10:</i> la eficacia de la administración oral de fármacos cargados en nanopartículas de quitosano mediante la mejora de la absorción del fármaco a través del epitelio intestinal. Fuente: Mohammed et. al. (2019).....	23
<i>Figura 11:</i> Clasificación de biopolímeros usados para envases de comida.	24
<i>Figura 12:</i> (A) Dispositivo de celda solar fabricado y capas detalladas de la celda solar; (B) caracterización J-V de la celda solar sobre sustrato ITO/GNP-CNC bajo iluminación de 90 mW/cm ² ; (C) caracterización J-V en una escala semilogarítmica en la oscuridad (línea inferior) y bajo iluminación (línea superior); (D) caracterización J-V de la celda solar sobre sustrato de vidrio/ITO bajo iluminación de 90 mW/cm ²	25
<i>Figura 13:</i> Diagrama esquemático de una batería Li-ion con electrolito basado en biopolímeros.....	25
<i>Figura 14:</i> Forma y estructura química de la amilopectina y la amilosa	26
<i>Figura 15:</i> (A) Estructura del polisacárido ulvan reticulado con BDDE. (B) Topografía superficial de las membranas de ulvan reticuladas.	27
<i>Figura 16:</i> Estructura de los oligosacáridos aislados de <i>Notoc commune</i>	28
<i>Figura 17:</i> Sistema de reflujo armado para la extracción de EPS.....	31
<i>Figura 18:</i> Precipitación EPS	32
<i>Figura 19:</i> Aspecto de los EPS precipitados.....	32
<i>Figura 20:</i> Imagen representativa del EPS purificado.	33
<i>Figura 21:</i> Protocolo de extracción de EPS	33
<i>Figura 22:</i> Imagen representativa del Ulvan obtenido.....	34
<i>Figura 23:</i> Protocolo de extracción de Ulvan.	35
<i>Figura 24:</i> Imagen representativa de biopolímero de Carragenina obtenida.	36
<i>Figura 25:</i> Protocolo de extracción de Carragenina.	36

<i>Figura 26:</i> Imagen representativa del almidón obtenido.....	37
<i>Figura 27:</i> Protocolo de extracción del Almidón.....	38
<i>Figura 28:</i> Imagen representativa de la lámina de EPS.....	39
<i>Figura 29:</i> Imagen representativa de la lámina de Ulvan.....	40
<i>Figura 30:</i> Imagen representativa de la lámina de carragenina.....	40
<i>Figura 31:</i> Imagen representativa de la lámina de almidón.....	41
<i>Figura 32:</i> Maquina de ensayos a tracción ESM Mark-10.....	42
<i>Figura 33:</i> Spectrum Two PerkinElmer.....	42
<i>Figura 34:</i> Prototipo representativo de TENG Flexible Estirado.....	43
<i>Figura 35:</i> Prototipo representativo TENG Flexible Cerrado.....	43
<i>Figura 36:</i> Prototipo de TENG Flexibles con recubrimiento de corrospum a) sin fuerza de compresión aplicada sobre las capas y b) con fuerza de compresión aplicada sobre las capas.....	44
<i>Figura 37:</i> Imagen representativa de prototipos de TENG Flexibles a base de a) cartón corrugado, b) Corrospum, c) cartulina plastificada y d) Corrospum aislado.....	44
<i>Figura 38:</i> Imagen representativa de prototipo de TENG fabricado con lámina de biopolímero.....	46
<i>Figura 39:</i> Osciloscopio Tektronix DPO2022.....	49
<i>Figura 40:</i> TENG conectado al puente de diodos.....	49
<i>Figura 41:</i> Representación esquemática del puente de diodos rectificador conectado a un TENG.....	50
<i>Figura 42:</i> Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de Carragenina.....	51
<i>Figura 43:</i> Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de Almidón.....	52
<i>Figura 44:</i> Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de EPS.....	53
<i>Figura 45:</i> Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de Ulvan.....	54
<i>Figura 46:</i> Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de carragenina.....	56
<i>Figura 47:</i> Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de almidón.....	57
<i>Figura 48:</i> Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de EPS.....	58
<i>Figura 49:</i> Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de Ulvan.....	59
<i>Figura 50:</i> Gráfica representativa de picos generados por un TENG.....	60
<i>Figura 51:</i> Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG A.....	60
<i>Figura 52:</i> Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG B.....	61
<i>Figura 53:</i> Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG C.....	61
<i>Figura 54:</i> Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG D.....	62
<i>Figura 55:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 1.....	63
<i>Figura 56 :</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 1 rectificado.....	63
<i>Figura 57 :</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 2.....	64
<i>Figura 58:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 2 rectificado.....	64
<i>Figura 59:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 3.....	65
<i>Figura 60:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 3 rectificado.....	65
<i>Figura 61:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 4.....	66
<i>Figura 62:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 4 rectificado.....	66
<i>Figura 63:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 5.....	67
<i>Figura 64:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 5 rectificado.....	67
<i>Figura 65:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 6.....	68
<i>Figura 66:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 6 rectificado.....	68
<i>Figura 67:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 7.....	69
<i>Figura 68:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 7 rectificado.....	69
<i>Figura 69:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 8.....	70
<i>Figura 70:</i> Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 8 rectificado.....	70
<i>Figura 71:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 1.....	72
<i>Figura 72:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 1 rectificado.....	72
<i>Figura 73:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 2.....	73

<i>Figura 74:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo en TENG 2 rectificado.....	73
<i>Figura 75:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 3	74
<i>Figura 76:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 3 rectificado.....	74
<i>Figura 77:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 4	75
<i>Figura 78:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 4 rectificado.....	75
<i>Figura 79:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 5	76
<i>Figura 80:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 5 rectificado.....	76
<i>Figura 81:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 6	77
<i>Figura 82:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 6 rectificado.....	77
<i>Figura 83:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 7	78
<i>Figura 84:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 7 rectificado.....	78
<i>Figura 85:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 8	79
<i>Figura 86:</i> Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 8 rectificado.....	79



INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de fuentes de energía sostenibles y autónomas, los nanogeneradores triboeléctricos han surgido como dispositivos prometedores capaces de convertir la energía mecánica en electricidad, estos dispositivos aprovechan el efecto triboeléctrico, un fenómeno físico que se produce cuando dos materiales diferentes se frotan entre sí y generan cargas eléctricas.

La generación de energía mediante nanogeneradores triboeléctricos presenta numerosas ventajas en términos de eficiencia, flexibilidad y capacidad de miniaturización, lo que los convierte en una solución atractiva para diversas aplicaciones en electrónica portátil, sensores y dispositivos médicos, sin embargo, uno de los aspectos cruciales en la fabricación de estos dispositivos radica en la selección de materiales adecuados que maximicen su eficiencia y estabilidad.

En este contexto, los biopolímeros han ganado atención significativa como una alternativa prometedora a los polímeros sintéticos convencionales en la fabricación de nanogeneradores triboeléctricos. Estos biopolímeros se obtienen de fuentes naturales renovables, como algas, plantas y microorganismos, presentan propiedades únicas que los hacen altamente atractivos para su implementación en estos dispositivos tales como, la flexibilidad, biodegradabilidad, resistencia mecánica y capacidad de carga electrostática, que son fundamentales para el funcionamiento óptimo de los nanogeneradores triboeléctricos.

Esta tesis, se centra en la exploración de la fabricación de nanogeneradores triboeléctricos (TENGs) utilizando láminas triboeléctricas obtenidas de biopolímeros como superficies activas para los TENGs. Se investigarán las características y propiedades de diferentes los biopolímeros empleados en la fabricación de estos dispositivos, evaluando su desempeño en comparación con los dispositivos fabricados con polímeros sintéticos convencionales.

El objetivo final de esta investigación es explorar el campo de los nanogeneradores triboeléctricos basados en biopolímeros, aprovechando su potencial como una fuente de energía sostenible y autónoma.

Objetivo general

Fabricar un nanogenerador triboeléctrico empleando superficies activas basadas en láminas de biopolímeros.

Objetivos específicos

- Desarrollo de láminas triboeléctricas a partir de biopolímeros
- Caracterización mecánica y fisicoquímica de las láminas obtenidas
- Diseño y desarrollo de prototipo de nanogenerador triboeléctrico (TENG)
- Emplear las láminas triboeléctricas de biopolímeros como superficies activas para la fabricación de TENGs
- Analizar el voltaje en circuito abierto de los TENGs fabricados.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo presentaremos la base teórica relacionada a los Nanogeneradores triboeléctricos y a los polímeros naturales que se emplearán como láminas triboeléctricas.

1.1. Efecto triboeléctrico

El efecto triboeléctrico es un fenómeno físico que se produce cuando dos materiales diferentes entran en contacto y luego se separan, generando cargas eléctricas en la superficie de los materiales. Este proceso se debe a la transferencia de electrones entre los materiales durante el contacto y la separación (Figura 1). El material que tiene una tendencia a perder electrones adquiere una carga eléctrica positiva y el material que tiene una tendencia a ganar electrones adquiere una carga eléctrica negativa (Zhang & Olin, 2020).

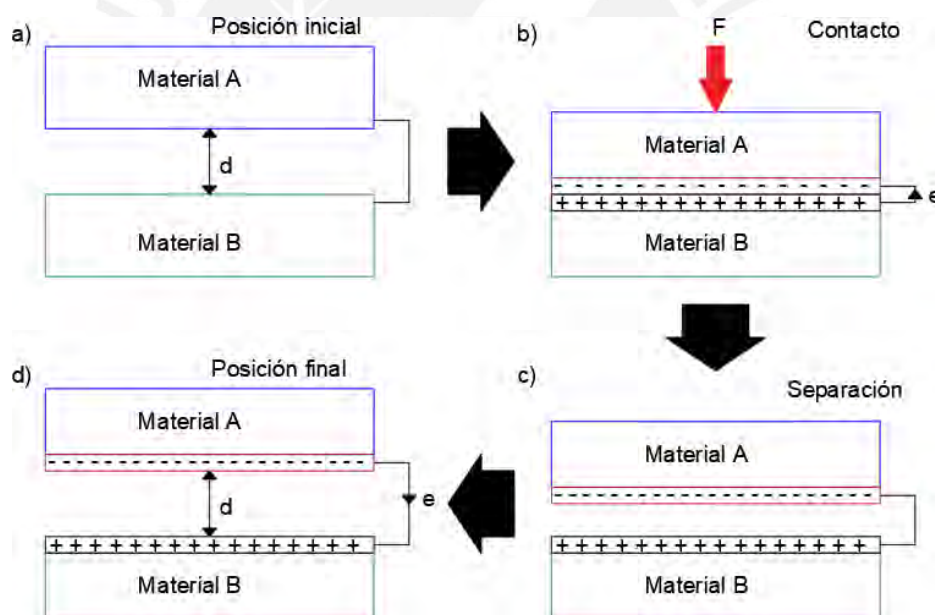


Figura 1: Esquema de 2 materiales en contacto en el que se muestra el intercambio de electrones en a) antes del contacto, b) en contacto, y c) después del contacto, mostrando la transferencia de electrones de un material al otro, cargando uno positivamente y otro negativamente. d) Liberación de carga del material.

Este efecto fue descubierto alrededor de año 600 A. c. cuando el filósofo griego Thales de Mileto describió por primera vez fenómenos electrostáticos producidos al frotar fragmentos de ámbar con una tela de lana y comprobar su capacidad de atracción sobre pequeños objetos.

En el siglo XVII, Otto von Guericke construyó la primera máquina electrostática (Figura 2), capaz de producir triboelectricidad. Esta máquina consistía en una bola de azufre que hacía girar con una mano y frotaba con la otra, obteniendo una carga sobre la esfera con la cual podía atraer o repeler pequeños objetos, o realizar pequeñas descargas eléctricas cuando acercaba un conductor a la esfera. (La historia de la electricidad, Centro de Capacitación Profesional EPEC).



Figura 2: Ilustración de la máquina de Otto von Guericke.
Fuente: Gerlier S. XIX

En el año 1861 Maxwell presentó un trabajo llamado “*On Physical Lines of Force*” este trabajo definiría el conocimiento del electromagnetismo con las llamadas “ecuaciones de Maxwell” estas ecuaciones son la fundación de muchas de las tecnologías actuales debido a su amplia aplicación, tales como comunicaciones inalámbricas, fotónica y muchas más. Una de las ideas que Maxwell presentó en su trabajo fue la introducción de la corriente de desplazamiento en la ley de Ampere, la derivada en el tiempo de un campo eléctrico, con lo cual fue capaz de probar la equivalencia entre la electricidad y el magnetismo (Wang, 2020). Las ecuaciones de Maxwell, en la actualidad, son utilizadas para calcular la cantidad de energía generada por un nanogenerador (NG), lo que se discute con mayor profundidad en el capítulo 1.2. Los NG son considerados un campo que utiliza la corriente de desplazamiento como se observa en la figura 3 como fuerza motriz para convertir eficazmente la energía mecánica en energía/señal eléctrica, independientemente de si se utilizan nanomateriales o no (Wang, 2020)

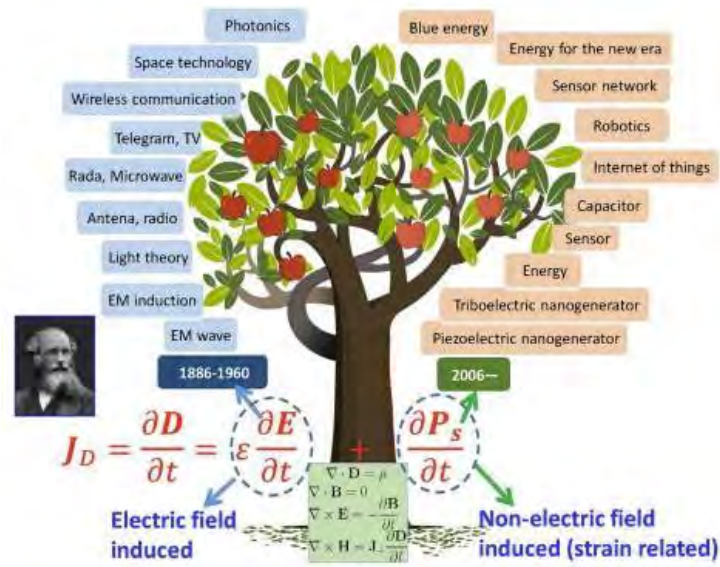


Figura 3: Un árbol de ideas para ilustrar la corriente de desplazamiento de Maxwell recién revisada: el primer término $\epsilon \partial E / \partial t$ es responsable de la teoría de las ondas electromagnéticas; y el término recién añadido debido a $\partial P_s / \partial t$ son las aplicaciones de las ecuaciones de Maxwell en energía y sensores, que son los nanogeneradores.

Fuente: Wang Z. (2020)

1.1.1. Parámetros importantes

El efecto triboeléctrico se puede observar midiendo los diferentes medios de carga y evaluando su carga superficial y profundidad de inyección de carga. Para hacer esto, se requieren modelos adecuados y una evaluación cuidadosa de los parámetros importantes. Los medios de carga pueden ser electrones, iones o nanomateriales y se dividen en función de su capacidad de carga unitaria (Pan & Zhang, 2019).

- Profundidad de inyección de carga: El efecto triboeléctrico causa la transferencia, estabilización y retención dinámicas de carga en la interfaz triboeléctrica. Si se mantiene la carga, la interfaz triboeléctrica exhibirá características de capacitancia. En cualquier modo de contacto triboeléctrico utilizado, la carga solo será efectiva hasta una cierta profundidad, conocida como profundidad de inyección o penetración de carga “ λ ”, donde se forma la capacitancia. Se puede describir las características de capacitancia del efecto triboeléctrico utilizando la ecuación:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k \lambda} \dots\dots\dots (1)$$

k = constante electrostática

ϵ =constante dieléctrica del material

- Densidad de carga superficial: La densidad de carga superficial " σ " es un parámetro que se utiliza para medir los efectos de carga final en ambas superficies y tiene un impacto significativo en la eficiencia de los dispositivos triboeléctricos. Este parámetro se utiliza para analizar otros parámetros eléctricos como la densidad de potencia de área de corriente y la densidad de energía volumétrica. También es útil para relacionar y analizar las características y el rendimiento eléctrico de la interfaz, como se indica en la ecuación:

$$V = f(Q) = f(A_{eff} * \sigma) \dots\dots\dots (2)$$

A_{eff} = Area efectiva de contacto

Q = Carga de la superficie

1.1.2. Factores que influyen a la triboelectricidad

Debido a que la triboelectricidad se da debido al contacto de distintos materiales hay factores que influyen en la generación de energía, tales como factores físicos (forma, tamaño, microestructura) y también factores externos que pueden llevar a resultados diferentes en ambientes similares Zhang & Pan estudiaron algunos de estos factores, los cuales son los siguientes:

- Superficie de contacto: la superficie de contacto entre 2 materiales distintos influye debido a que a mayor superficie de contacto se generará una mayor carga superficial y por ende una mayor energía producida por la triboelectricidad.
- Microestructura: La microestructura de los materiales es otro factor importante que puede determinar la capacidad de generar energía, ya que influye en las propiedades superficiales del material tales como rugosidad o textura la cual determina la eficiencia del contacto entre materiales.
- Tamaño de partícula: Para materiales de igual microestructura, el tamaño de partículas influye en la capacidad de carga de los materiales, ya que al tener partículas de menor tamaño estas complementan a las de mayor tamaño y mejora la rugosidad superficial.
- Carga (Fuerza): La carga aplicada al contacto entre materiales influye debido a la energía transferida a las superficies a modo de fricción o presión superficial.
- Factores ambientales: Los factores ambientales tales como la humedad, tienen un efecto grande sobre la capacitancia de los materiales debido a las propiedades inherentes de estos como por ejemplo la higroscopicidad, un material altamente higroscópico puede modificar su comportamiento en un ambiente húmedo.

1.1.3. Serie triboeléctrica

La serie triboeléctrica es una lista de materiales que se ordenan según su tendencia a ganar o perder electrones cuando entran en contacto y se separan. Esta lista se utiliza para predecir la polaridad de carga que se generará en la superficie de dos materiales diferentes cuando se frotran entre sí.

En la serie triboeléctrica, mostrada en la Figura 4 los materiales se ordenan desde los que tienen una mayor tendencia a perder electrones (es decir, a cargarse positivamente) hasta los que tienen una mayor tendencia a ganar electrones (es decir, a cargarse negativamente). Por lo tanto, si se frota un material de la parte superior de

la lista con un material de la parte inferior de la lista, el material de la parte superior perderá electrones y se cargará positivamente, mientras que el material de la parte inferior ganará electrones y se cargará negativamente (Lacks & Mohan Sankaran, 2011; Lowell & Rose-Innes, 1980; Pan & Zhang, 2019).

Más cargado positivamente (+)	Δ
Cabello, pelaje	Bronce
Vidrio	Plata
Mica	Oro
Lana	Poliéster (PET)
Nylon	Poliestireno
Plomo	Acrílico
Seda	PVC
Aluminio	PVC c/ plastificante
Papel	Silicio
Madera	Polietileno
Ámbar	Polipropileno
Cera	PTrFE
Globo de goma	Teflón (PTFE)
Níquel	Silicona
Cobre	Ebonita
∇	Más cargado negativamente (-)

Figura 4: Serie triboeléctrica cualitativa adaptado de “Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review”
Fuente: Pan & Zhang. (2019)

1.2. Nanogeneradores triboeléctricos

Los nanogeneradores triboeléctricos (*triboelectric nanogenerators, TENGs*) son dispositivos que pueden generar electricidad a partir de la fricción o el contacto entre dos materiales diferentes. Estos dispositivos aprovechan esta energía mecánica generada para producir una diferencia de potencial y corriente eléctrica. Algunas de sus principales características son:

- Diversidad de modalidades de trabajo dependiendo del diseño, del sistema o mecanismo establecido
- Conversión energética de alta eficiencia (mecánica a eléctrica)
- Previsibilidad del proceso de fabricación a gran escala
- Amplia variedad de materiales empleables para su construcción

Estos dispositivos son una tecnología emergente que vio la luz en el año 2012, cuando Wang et al desarrollaron el primer nanogenerador triboeléctrico este dispositivo se compone de dos láminas de polímero fabricadas con materiales que presentan características triboeléctricas distintas (Figura 5a). Estas láminas están recubiertas con películas metálicas en la parte superior e inferior de la estructura ensamblada. Cuando se someten a deformación mecánica, la fricción entre las dos láminas, causada por la rugosidad superficial a nivel nanométrico, genera cargas de igual magnitud, pero con signos opuestos en cada uno de los lados, desde entonces se lleva a cabo una extensa investigación para ampliar los campos de aplicación de estos dispositivos. (Ma et al., 2018).

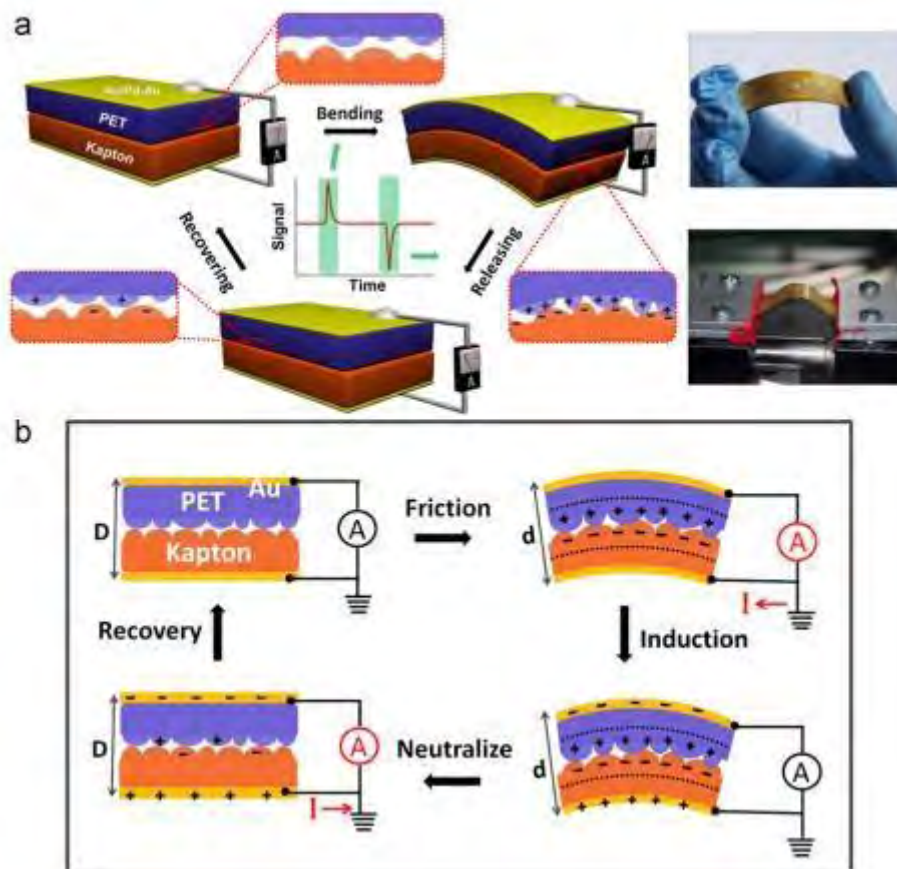


Figura 5: (a) Imagen representativa del prototipo de Wang (b) Mecanismo de TENG propuesto por Wang.

Fuente: Wang et al. (2012)

1.2.1. Métodos de generación de energía

Los principales métodos de generación de energía son los siguientes:

- Contacto-Separación: Este método implica la separación de dos materiales diferentes que estaban en contacto (Figura 6a). Al separarse, se genera una carga eléctrica en la superficie de los materiales. Este método es el más reportado en la literatura debido a que la deformación mecánica abarca la mayor área de las superficies activas de las láminas triboeléctricas.
- Frotación-deslizamiento: Este es el método más común de generación triboeléctrica. Implica frotar dos materiales diferentes juntos para generar una carga eléctrica (Figura 6b). La cantidad de carga generada depende de varios factores, como el área de contacto, la fuerza de fricción y las propiedades de los materiales. El principal inconveniente de este método es que al estar siempre en contacto y fricción los materiales se gastan rápidamente y se tienen que cambiar para volver a generar la carga.
- Electrodo simple: Este método funciona debido al contacto y separación entre un material y un electrodo (Figura 6c) a diferencia de los anteriores métodos en los cuales tenemos 2 materiales y 2 electrodos.
- Capa triboeléctrica independiente.: Este método una capa triboeléctrica estará fuera de contacto con los electrodos, solo hará contacto con las capas triboeléctricas (Figura 6d). Este método se utiliza a menudo en la fabricación de dispositivos triboeléctricos que requieren encapsulado de un material que se mueva libremente para generar energía.

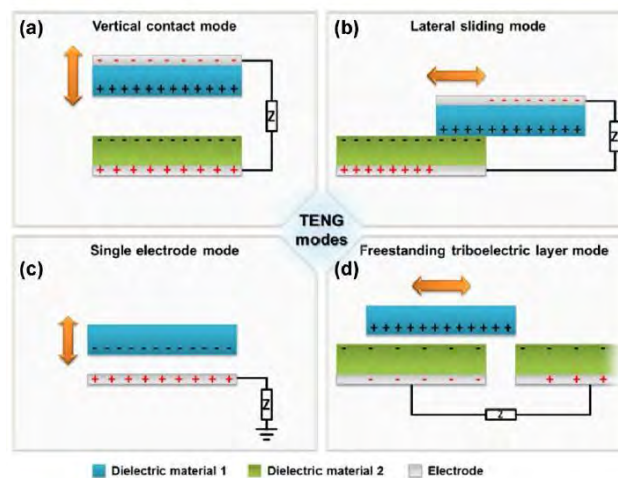


Figura 6: Los cuatro modos fundamentales de los TENG: (a) modo de contacto-separación vertical, (b) modo de frotación-deslizamiento lateral, (c) modo de electrodo simple y (d) modo de capa triboeléctrica independiente.

Fuente: Pan & Zhang. (2019)

1.2.2. Aplicaciones de TENGs

En los principales grupos de aplicación tenemos:

- Electrónica portátil: Los TENGs pueden ser utilizados para la carga de dispositivos electrónicos portátiles, como los teléfonos, wearables o linternas en caso de no contar con acceso a la red eléctrica, también pueden ser utilizados para dispositivos autónomos integrados con el internet de las cosas (IoT), ya que estos necesitan estar conectados a las redes inalámbricas.
- Sensores: Los TENGs pueden ser utilizados como sensores de presión, vibración o temperatura, los cuales los hace versátiles y valiosos en la implementación de sensores para equipos que no tengan acceso a baterías, por ejemplo, Fan et al. Fabricaron un sensor de presión basados en el principio de generación de voltaje por compresión, utilizando la medición de la deformación relativa de dos capas de polímero (Figura 7a), el sensor pudo detectar presiones suaves, incluso la caída de una pluma, con una presión de contacto de solo 0.4 Pa. Yang et al. propusieron un diseño similar que integraba conjuntos de generadores triboeléctricos de un solo electrodo para mapear la presión (Figura 7f). Al utilizar la energía generada por cada generador para iluminar los correspondientes LED, se lograba visualizar una distribución de la presión (Ma et al., 2018).

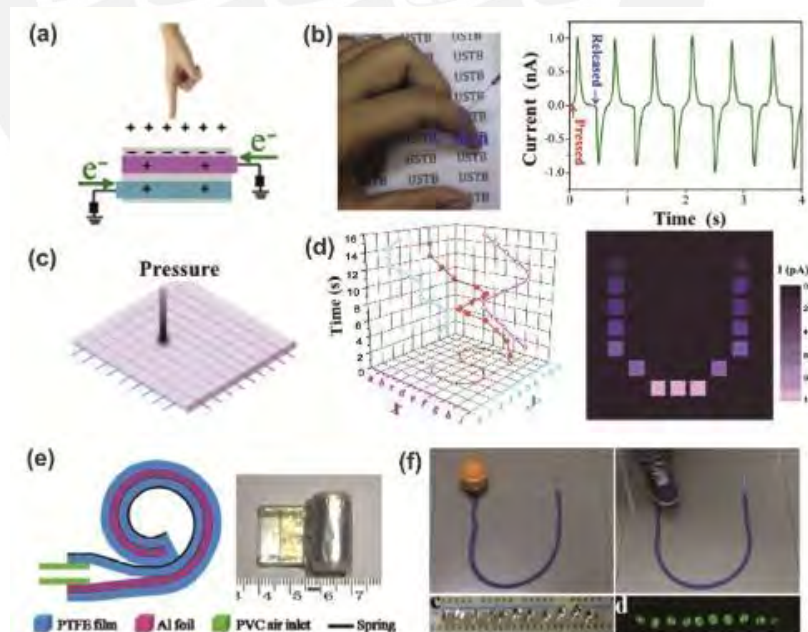


Figura 7: Los TENG como sensores de presión autoalimentados. (a) Mecanismos de detección de presión del sensor de alta resolución. (b) El dispositivo en un dedo humano detecta la presión a través de la punta de acero. (c) Los conjuntos de TENG detectan la información de la presión aplicada. (d) Curva de trayectoria táctil de la punta medida. (e) Diagrama esquemático del TENG autorrecuperable. (f) TENG utilizado para detectar la presión al pisar una bomba de aire.

Fuente: Ma et al. (2018)

- Energía obtenida del ambiente: Los TENGs pueden recolectar energía a partir de la energía mecánica presente en el entorno, como el viento, el agua y los movimientos humanos, lo que los convierte en una opción atractiva para la generación de energía renovable y sostenible, por ejemplo, Wang et al. fabricaron un TENG aeroelástico accionado por aleteo para producir energía eólica. Este TENG consistía en una película de kapton con dos electrodos de cobre, fijados en ambos extremos en un canal de fluido hecho de acrílico (Figura 8a), este prototipo funcionaba a partir del movimiento de la película de kapton producido por una corriente de aire, y debido a este movimiento entrar en contacto con el PTFE, lo cual generaría el efecto triboeléctrico deseado.

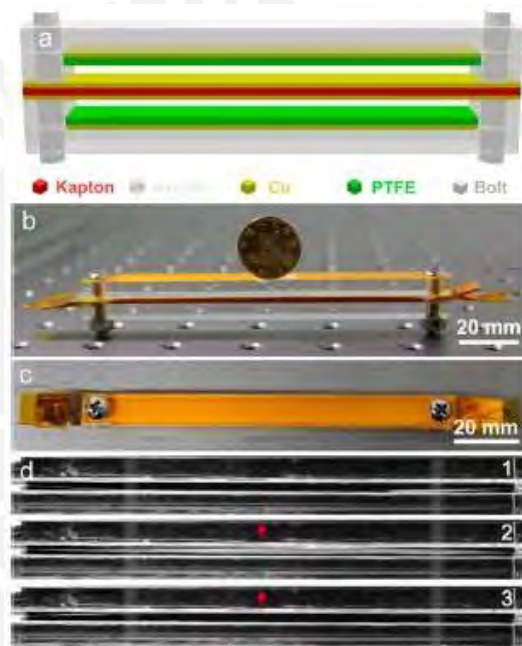


Figura 8: (a) Diagrama esquemático del TENG fabricado. (b) Vista transversal de la TENG fabricado. (c) Vista superior de la TENG fabricado. (d) Fotografías del TENG en movimiento tomadas con una cámara de alta velocidad.

Fuente: Wang et al. (2018)

1.3. Biopolímeros

Los biopolímeros son polímeros naturales producidos por organismos vivos, los biopolímeros se pueden extraer de algas, bacterias, plantas, animales y otras fuentes naturales (Sanchis et al., 2017; Torres et al., 2011) Estos polímeros naturales tienen varias características únicas que los hacen atractivos para una amplia gama de aplicaciones, tanto en la industria alimentaria como en la fabricación de productos biodegradables.

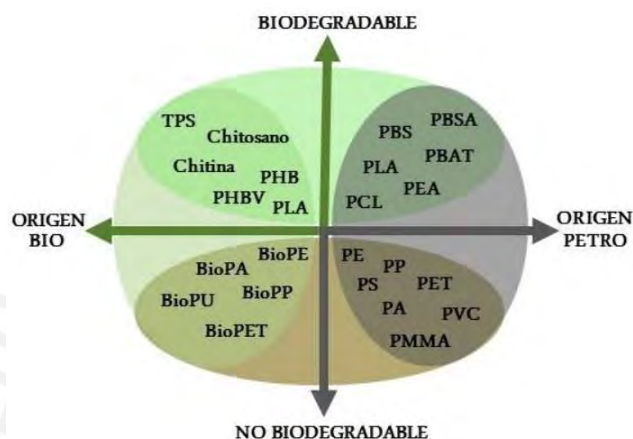


Figura 9: Clasificación de los polímeros según su origen y biodegradabilidad.
Fuente: Instituto tecnológico de materiales

1.3.1. Características y propiedades

Como principales características en biopolímeros tenemos:

- **Biodegradabilidad:** muchos biopolímeros son biodegradables y pueden descomponerse en la naturaleza, lo que los hace más amigables con el medio ambiente que los polímeros sintéticos.
- **Biocompatibilidad:** los biopolímeros son biocompatibles y no tóxicos, lo que los hace seguros para su uso en aplicaciones médicas y farmacéuticas.
- **Renovable:** muchos biopolímeros se producen a partir de fuentes renovables, como plantas y algas, lo que los hace más sostenibles que los polímeros sintéticos producidos a partir de petróleo.
- **Versatilidad:** los biopolímeros tienen una amplia variedad de propiedades físicas y químicas, lo que los hace útiles en una amplia gama de aplicaciones.

1.3.2. Aplicaciones

Los biopolímeros son materiales muy versátiles y con una creciente demanda, lo cual hace que tenga muchos campos de aplicación, los principales son:

- Biomédica: los biopolímeros se utilizan a menudo en la producción de suturas y otros implantes médicos debido a su biocompatibilidad y capacidad para descomponerse en el cuerpo con el tiempo, como por ejemplo el estudio de Mohammed et al. en el cual se realizan fármacos cargados de nanopartículas de un biopolímero llamado quitosano, las cuales mejoran la absorción de los fármacos a través del intestino como se puede observar en la Figura 10.

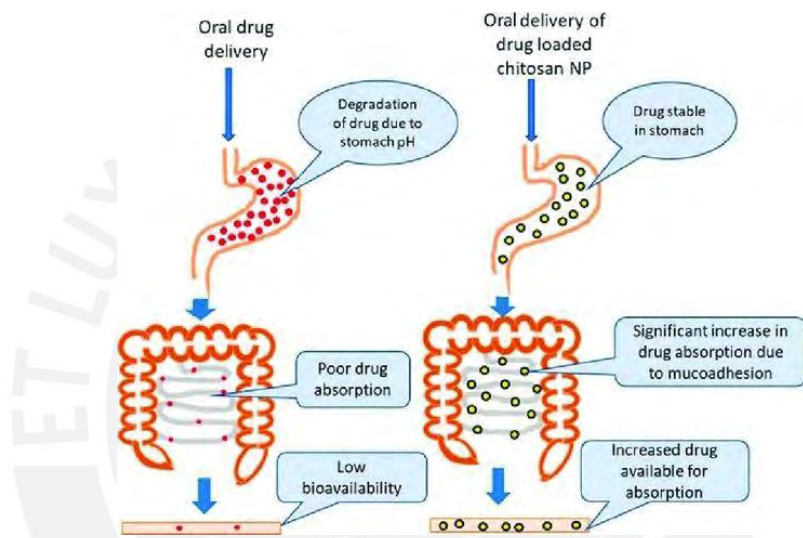


Figura 10: la eficacia de la administración oral de fármacos cargados en nanopartículas de quitosano mediante la mejora de la absorción del fármaco a través del epitelio intestinal.

Fuente: Mohammed et. al. (2019)

- Industria alimentaria: algunos biopolímeros se utilizan como aditivos alimentarios para mejorar la textura y la estabilidad de los alimentos, por ejemplo, la pectina como agente gelificante, emulsificante y agente estabilizador (Yapo et al., 2007).
- Envases biodegradables: los biopolímeros se utilizan a menudo en la producción de envases biodegradables y compostables que pueden descomponerse en la naturaleza en lugar de persistir en los vertederos. En el esquema mostrado en la Figura 11 podemos observar los principales usos de los biopolímeros en la industria de envasado de comida (Moeini et al., 2021).

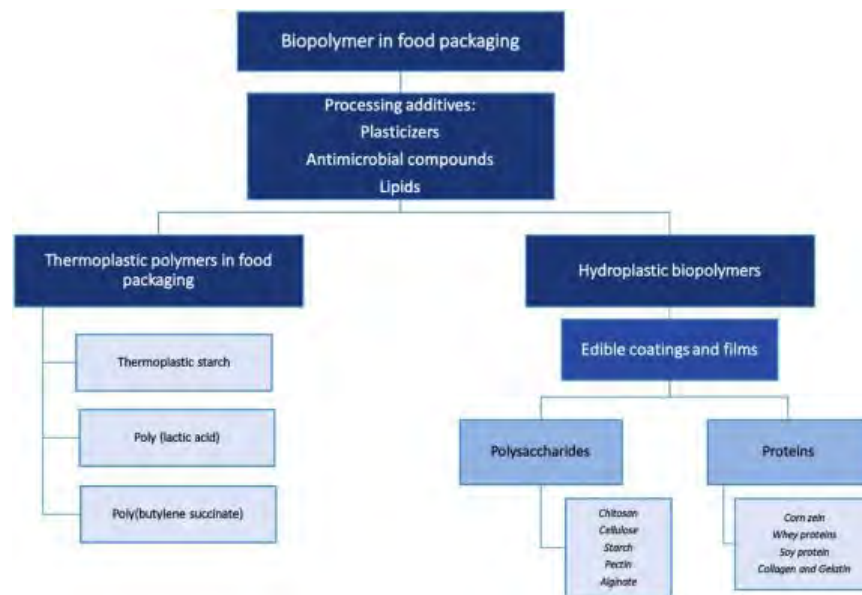


Figura 11: Clasificación de biopolímeros usados para envases de comida.
Fuente: Moeini et. al. (2021)

- Bioplásticos: los biopolímeros se utilizan a menudo en la producción de bioplásticos, que son una alternativa más sostenible a los plásticos convencionales producidos a partir de petróleo, por ejemplo, la empresa mexicana BIOFASE® produce bioplásticos a partir de la semilla de la palta o aguacate con los cuales producen cubiertos, platos y envases 100% biodegradables.
- Energía: En el campo de la energía los biopolímeros tienen múltiples aplicaciones y son utilizados en distintas áreas, como la fabricación de biocombustibles, aislantes térmicos o incluso materiales para la fabricación de paneles solares, por ejemplo, Mohiuddin et al., utilizaron celulosa y el grafeno como sustrato para las capas de una celda solar (Figura 12a), teniendo resultados prometedores para este tipo de tecnología.

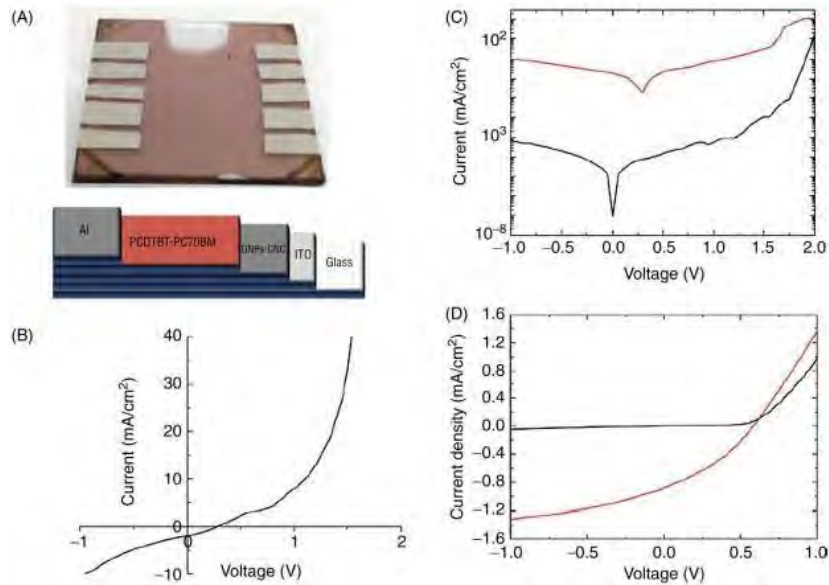


Figura 12: (A) Dispositivo de celda solar fabricado y capas detalladas de la celda solar; (B) caracterización J-V de la celda solar sobre sustrato ITO/GNP-CNC bajo iluminación de 90 mW/cm²; (C) caracterización J-V en una escala semilogarítmica en la oscuridad (línea inferior) y bajo iluminación (línea superior); (D) caracterización J-V de la celda solar sobre sustrato de vidrio/ITO bajo iluminación de 90 mW/cm².
Fuente: Ponnamma et al. (2017)

Otro caso importante de estudio lo realizaron Singh et al. los cuales utilizaron biopolímeros como electrolitos sólidos para baterías de sistemas fotovoltaicos (Figura 13) esta tecnología permite reemplazar los electrolitos líquidos usados usualmente en las baterías comerciales, por electrolitos sólidos, los cuales podrían mejorar la durabilidad y sostenibilidad de estas.

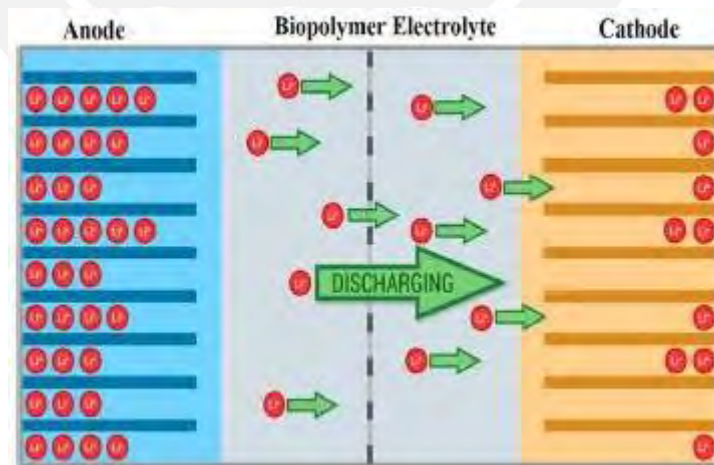


Figura 13: Diagrama esquemático de una batería Li-ion con electrolito basado en biopolímeros.
Fuente: Singh et al. (2016)

En esta tesis utilizaremos biopolímeros como principal materia prima para el desarrollo de superficies activas en forma de láminas triboeléctricas, las cuales serán ensambladas para la producción de TENGs.

1.3.3. Principales biopolímeros utilizados

- **Almidón**

El almidón es un biopolímero semicristalino que está compuesto por 2 macromoléculas conocidas como la amilosa y la amilopectina (Figura 14) (Troncoso & Torres, 2020)

El almidón es una de las principales materias primas para la producción de bioplásticos como el ácido poliláctico y el termoplástico de almidón. Si bien las fuentes más comunes de almidón son la papa, el maíz y el trigo; el almidón puede ser extraído de cualquier especie vegetal.

Los almidones obtenidos de diversas fuentes presentan variaciones en la proporción de amilosa y amilopectina, lo que resulta en propiedades distintas. Cuando el almidón se calienta en presencia de agua, los gránulos de almidón experimentan un hinchamiento irreversible y la amilosa se disuelve en la fase acuosa. Este fenómeno, que implica la modificación de la estructura granular debido a la ruptura de los enlaces de hidrógeno, se conoce como gelatinización. La gelatinización del almidón ocurre a diferentes temperaturas según el tipo de almidón, y en general, ocurre alrededor de los 70 °C bajo presión atmosférica (Torres et al., 2011).

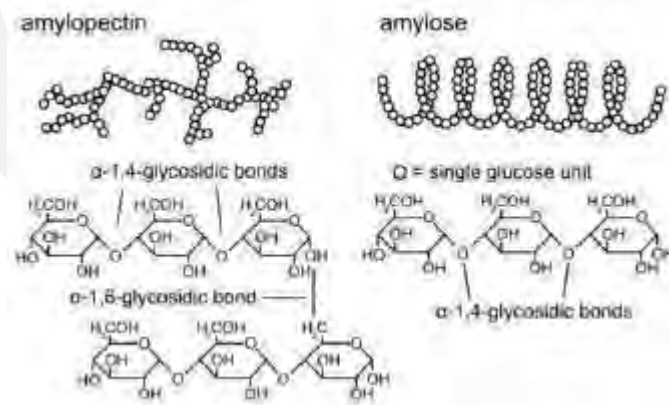


Figura 14: Forma y estructura química de la amilopectina y la amilosa.
Fuente: Willfahrt et. al. (2019)

- **Ulvan**

El ulvan es un polisacárido sulfatado que se extrae de las paredes celulares de las algas verdes del género *Ulva*, también conocidas como lechugas de mar (Tziveleka et al., 2019). Es un polisacárido complejo compuesto principalmente por unidades de ácidos urónicos, xilosa y ramnosa. Una de sus principales características es su alta afinidad por el agua por lo que puede ser usado para una

generar soluciones viscosas o geles (Kidgell et al., 2019), así como membranas (figura 15).

Muchas especies de algas verdes, en especial las del género *Ulva*, tienen una alta tasa de crecimiento y productividad en múltiples condiciones climáticas, por ello tienen una alta capacidad de explotación, por lo cual desarrollando un método de cultivo eficiente se puede producir bioproductos de alta calidad con múltiples aplicaciones en la industria de los biomateriales (Kidgell et al., 2019; Tziveleka et al., 2019)

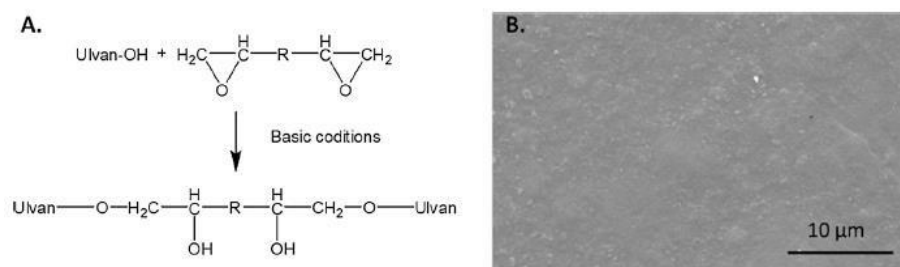


Figura 15: (A) Estructura del polisacárido ulvan reticulado con BDDE. (B) Topografía superficial de las membranas de ulvan reticuladas.

Fuente: Tziveleka et al. (2019)

- **EPS a partir de Cushuro**

El EPS (por sus siglas en inglés "Extracellular Polymeric Substances") se refiere a un grupo de biopolímeros producidos y secretados por microorganismos como bacterias, cianobacterias y algas, estos biopolímeros son sintetizados por los microorganismos para formar una matriz extracelular, en forma de cápsula, que les permite adherirse a superficies y protegerse del medio ambiente, y también conservar agua. se compone principalmente de polisacáridos, proteínas, vitaminas, minerales y lípidos (Gonzales et al., 2020; Weiner et al., 1995).

En el Perú tenemos el cushuro (*Nostoc Commune*), una cianobacteria comestible que se encuentra en las regiones altoandinas del país. Los EPS del cushuro son ricos en polisacáridos, principalmente compuestos por unidades de ramnosa, arabinosa y xilosa (Figura 16) (Rodriguez et al., 2017). El EPS tiene como principales propiedades, la alta absorción de agua y buena capacidad espumante, así como también propiedades antioxidantes y antifúngicas.

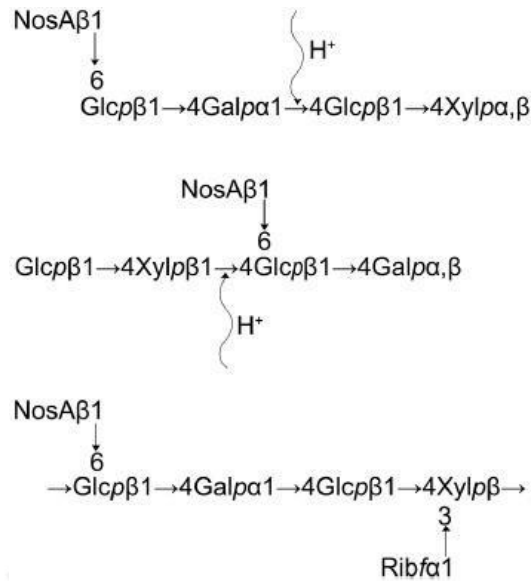


Figura 16: Estructura de los oligosacáridos aislados de *Notoc commune*.
Fuente: Gonzales et. al. (2020)

- **Carragenina**

La carragenina es un polisacárido sulfatado que se extrae de ciertas algas rojas, principalmente de la especie *Chondracanthus chamissoi*. Es un biopolímero ampliamente utilizado en la industria alimentaria como espesante, estabilizante y agente gelificante.

La carragenina se clasifica en tres tipos principales, según su estructura química y sus propiedades físicas: kappa (κ), iota (ι) y lambda (λ), que poseen uno, dos y tres grupos éster-sulfato, respectivamente (Torres et al., 2019b, 2019a). La carragenina kappa forma geles fuertes y rígidos en presencia de iones de calcio, mientras que la carragenina iota forma geles más suaves y elásticos en presencia de iones de calcio y potasio. La carragenina lambda no forma geles y se utiliza principalmente como agente espesante (Rodríguez et al., 2020; Stenner et al., 2016)

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

En este capítulo definiremos la metodología utilizada para la fabricación del nanogenerador triboeléctrico, desde la fabricación de las láminas hasta el desarrollo de los prototipos.

2.1. Desarrollo de láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros

Para este estudio desarrollamos laminas con 4 materiales distintos:

Tabla 1: Lista de materiales empleados para las láminas.

Material	Fuente
EPS	<i>Nostoc Commune</i>
Ulvan	<i>Ulva Nematoida</i>
Almidón	<i>Solanum tuberosum var. Huamantanga</i>
Carragenina	<i>Chondracanthus chamissoi</i>

2.1.1. Materiales

- Cianobacteria comercial
- Algas verdes comerciales
- Algas rojas comerciales
- Papas comerciales
- Filtro Watman
- Agua destilada
- Alcohol isopropílico
- Hidróxido de sodio 0.1 M
- Hielo
- Papel aluminio
- Soporte universal
- Balanza
- Sistema de reflujo
- Termómetro
- Balón de vidrio
- Cocinilla
- Agitador magnético
- Espátulas

- Colador
- Vaso de precipitados 100 ml, 500 ml, 1 l y 2 l.
- Placas de Petri
- Estufa
- Desecador
- Frasco estéril
- Gel refrigerante
- Etanol
- Bagueta
- Mortero con pilón
- Ultracentrífuga
- Metabisulfito de sodio
- Metanol
- Papa comercial
- Espátula
- Pelador

2.1.2. Proceso de extracción de EPS a partir de *Nostoc commune*

Las cianobacterias *Nostoc commune*, se lavaron las cianobacterias y se retiraron restos e impurezas presentes. Se preparó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1M y se mezcló con las cianobacterias lavadas. Por cada 150 g de cianobacteria (peso en húmedo), se añadió 700 ml de NaOH 0.1 M. La mezcla de cianobacterias se introdujo dentro de un balón de vidrio junto a un agitador magnético.

Dicho sistema está conformado por un balón de vidrio adaptado a un tubo refrigerante de reflujo por el cual pasa un flujo de agua fría como se muestra en la Figura 17. El balón de vidrio se envolvió con papel aluminio para conseguir una mayor distribución del calor por todo el sistema. El tiempo de extracción fue de 6 horas a 85°C – 90°C y agitación constante.



Figura 17: Sistema de reflujo armado para la extracción de EPS.

Luego de la etapa de extracción, se procedió a la precipitación de dichos EPS bajo un baño de hielo y mediante la adición de alcohol isopropílico en proporción 1:1 respecto a la mezcla inicial. Los precipitados de EPS se removieron de la parte superior del vaso de precipitados y se colocaron sobre una placa Petri. Se secaron en una estufa a una temperatura de 40 – 45°C durante 24 – 48 horas. Para purificar los EPS obtenidos, estos se disolvieron en agua destilada a 85°C por 2 horas. Después, se repitió el proceso de precipitación y secado en estufa dos veces. Los EPS purificados se almacenaron en un desecador a temperatura ambiente.

Los exopolisacáridos fueron extraídos mediante una solución básica de NaOH 0.1M y a 85°C de temperatura. La Figura 18 muestra la precipitación de los EPS mediante el uso de alcohol isopropílico y bajo un baño de hielo. Los EPS se retiran de la superficie del vaso de precipitados, se colocan en una placa de Petri y se secaron a 45 °C en una estufa con temperatura controlada.



Figura 18: Precipitación EPS.



Figura 19: Aspecto de los EPS precipitados.

Después del procedimiento de purificación de los exopolisacáridos, estos tuvieron el aspecto que se muestra en la Figura 19, un color marrón oscuro. Los EPS fueron llevados a un proceso de desecado, obteniendo EPS como se muestra en la figura 20, para su posterior utilización en las actividades correspondientes a la elaboración de films.



Figura 20: Imagen representativa del EPS purificado.

El protocolo que corresponde para la obtención de exopolisacáridos a partir de cianobacterias de la especie *Nostoc commune* es el que se muestra a continuación en la figura 21.

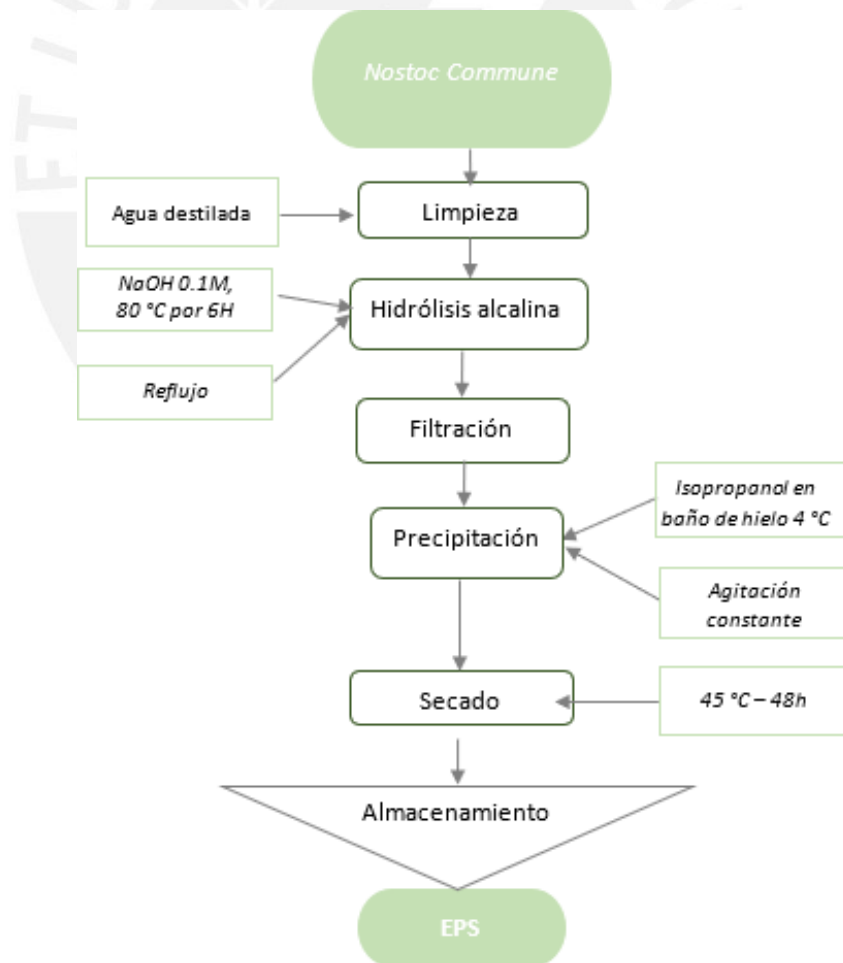


Figura 21: Protocolo de extracción de EPS.

2.1.3. Proceso de extracción de ulvan a partir de *Ulva Nematoides*

Las algas verdes se lavaron con abundante agua y se secaron en una estufa a 40 °C. Por cada 34.4 g de alga seca se agregan 500 ml de etanol y se deja por 24 h con agitación constante. Luego, se descarta el líquido y las algas obtenidas son secadas en una estufa a 40 °C por 48 h hasta evaporar el solvente. Después de la etapa de pre-tratamiento, las algas fueron colocadas en un beaker con 1200 ml de NaOH 0.1M. La mezcla se mantuvo en agitación constante por 6 h a 80 °C. Luego, se filtró para retirar los restos de algas de mayores dimensiones y se dejó agitando a temperatura ambiente por 24 h. La mezcla obtenida se concentró a 60 °C hasta disminuir su volumen a la mitad. Se utilizó una ultracentrífuga para separar los sólidos suspendidos a 10000 rpm por 10 min. Se colocó el doble del volumen de etanol respecto al volumen del sobrenadante en un beaker dentro de un baño de hielo. El sobrenadante fue vertido en etanol y el ulvan empezó a precipitar. Se realizó lavados del ulvan obtenido con etanol con el fin de purificarlo. Finalmente, se colocó en una estufa a 40 °C, se trituró y almacenó en un frasco estéril dentro de un desecador. En la figura 22 se muestra la imagen representativa del ulvan obtenido y en la figura 23 se incluye el protocolo de extracción del ulvan.



Figura 22: Imagen representativa del Ulvan obtenido.

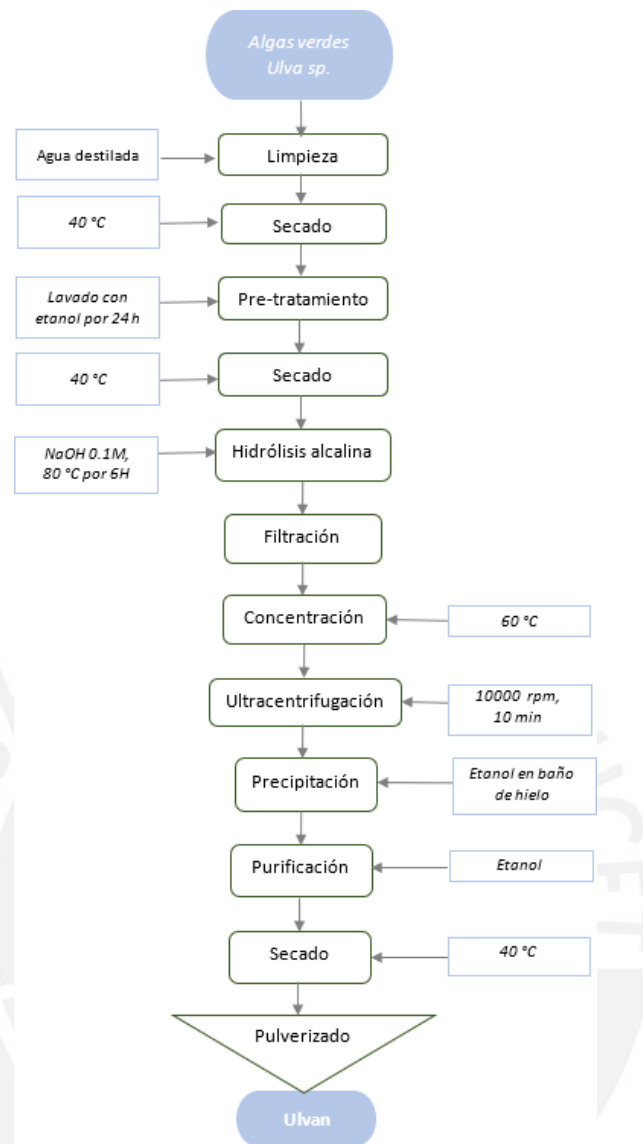


Figura 23: Protocolo de extracción de Ulvan.

2.1.4. Proceso de extracción de carragenina a partir de algas rojas

Las algas rojas fueron lavadas con abundante agua y secadas en una estufa a 40 °C. Por cada 10 g de alga seca se agregó 700 ml de NaOH 0.1M y se colocó en un balón acoplado a un sistema de reflujo. La mezcla se mantuvo en agitación constante por 6 h a 80 °C. Luego, se filtró para retirar los restos de algas. Se utilizó una ultracentrífuga para separar los sólidos suspendidos a 10000 rpm por 10 min. Se colocó el doble del volumen de isopropanol respecto al volumen del sobrenadante en un beaker dentro de un baño de hielo. El sobrenadante fue vertido en el beaker que contiene isopropanol y la carragenina empezó a precipitar. Se realizó lavados de la carragenina obtenida con isopropanol. Finalmente, la carragenina fue secada en una estufa a 40 °C,

triturada y almacenada. En la figura 24 se muestra la imagen representativa de la carragenina obtenida y en la figura 25 se incluye el protocolo de extracción de la carragenina.



Figura 24: Imagen representativa de biopolímero de Carragenina obtenida.

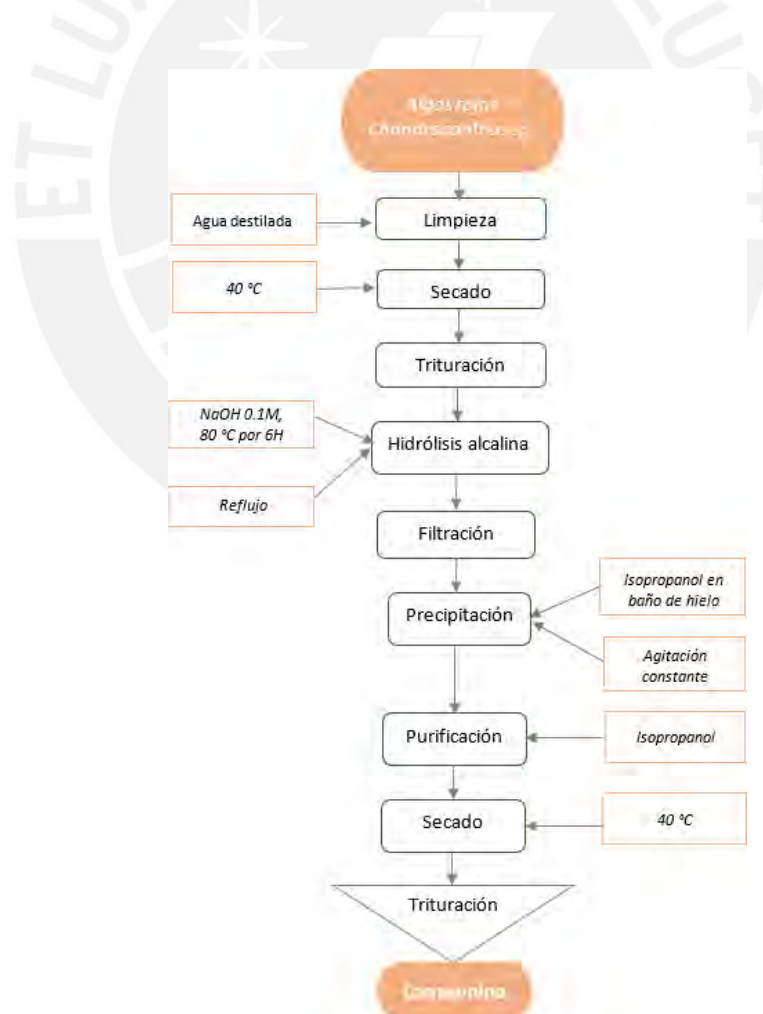


Figura 25: Protocolo de extracción de Carragenina.

2.1.5. Proceso de extracción de almidón a partir de papa

Las papas comerciales se pelaron y se trituraron empleando una proporción en peso de papa: solución acuosa de bisulfito de sodio en agua (0.01% w/v) de 1:2. La suspensión obtenida se dejó en reposo durante 1 hora o hasta que se observó la formación de un sedimento blanco. Se procedió a retirar el sobrenadante (líquido superior), y se añadió agua para lavar el sedimento (gránulos de almidón), repitiendo este proceso por triplicado considerando que en la última etapa del lavado se realizó con una solución de Metanol: Agua de 1:2 (v/v). Finalmente, se recolectó el sedimento limpio, y se colocó en una estufa a 40°C hasta peso constante. Los gránulos de almidón secos se trituraron y almacenaron en un desecador a temperatura ambiente hasta su posterior uso. En la figura 26 se muestra la imagen representativa del almidón obtenido en la figura 27 se incluye el protocolo de extracción de almidón.



Figura 26: Imagen representativa del almidón obtenido.

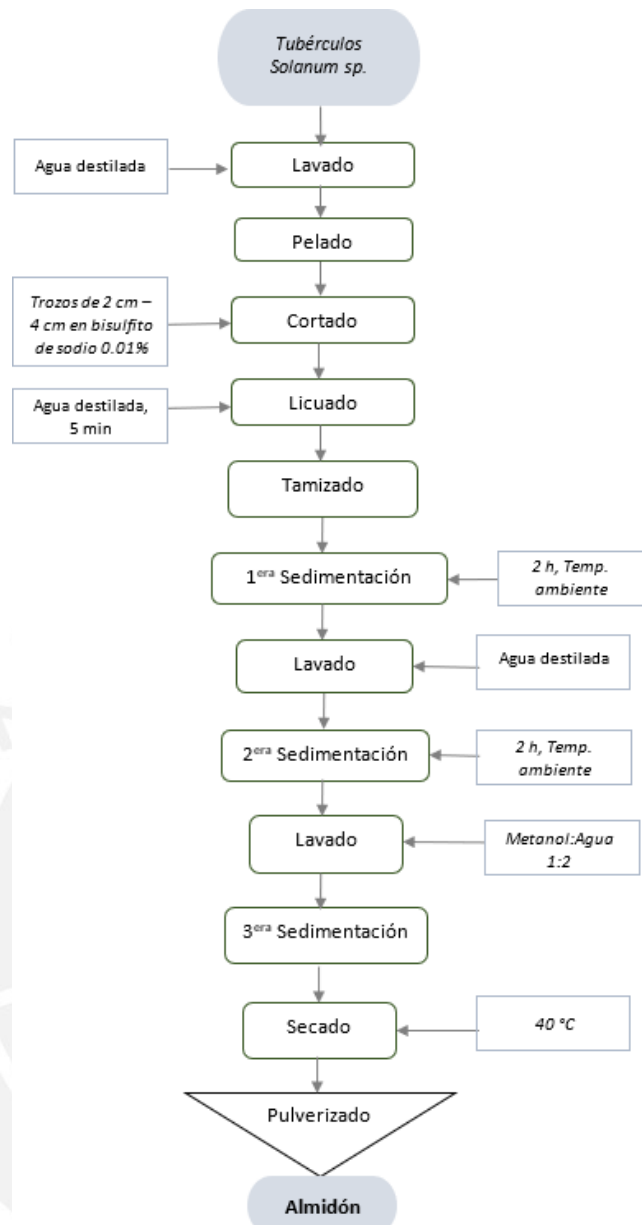


Figura 27: Protocolo de extracción del Almidón.

2.2. Fabricación de láminas de biopolímeros

2.2.1. Fabricación de láminas de EPS

Con el EPS obtenido en la sección 2.1.2 se realizó el siguiente procedimiento para la fabricación de láminas:

Se utilizó una solución de EPS al 1% w/v en agua a 70° con 10% en peso de glicerol. Dicha mezcla se vertió en moldes tipo placa de Petri. Para luego ser colocado dentro de un horno a 40° por 72 horas. Finalmente obtenemos láminas como se muestra en la figura 28.



Figura 28: Imagen representativa de la lámina de EPS.

2.2.2. Fabricación de láminas de ulvan

Con el Ulvan obtenido en la sección 2.1.3 se realizó el siguiente procedimiento para la fabricación de láminas:

Se utilizó una solución de ulvan al 1% w/v en agua a 70° agitándose con un agitador magnético a 400 rpm durante 12 horas. Luego, se agregó 10% en peso de glicerol a la mezcla y se mezcló durante 10 minutos adicionales. Dicha mezcla se vertió en moldes tipo placa de Petri. Para luego ser colocado dentro de un horno a 40° por 72 horas. Finalmente obtenemos láminas como se muestra en la figura 29.



Figura 29: Imagen representativa de la lámina de Ulvan

2.2.3. Fabricación de láminas de carragenina

Con la carragenina obtenida en la sección 2.1.4 se realizó el siguiente procedimiento para la fabricación de láminas:

Se utilizó una solución de carragenina al 1% w/v en agua a 70° agitándose con un agitador magnético a 400 rpm durante 12 horas. Luego, se agregó 10% en peso de glicerol a la mezcla y se mezcló durante 10 minutos adicionales. Dicha mezcla se vertió en moldes tipo placa de Petri. Para luego ser colocado dentro de un horno a 40° por 72 horas.

Finalmente obtenemos láminas como se muestra en la figura 30.



Figura 30: Imagen representativa de la lámina de carragenina

2.2.4. Fabricación de láminas de almidón

Con el almidón obtenido en la sección 2.1.5 se realizó el siguiente procedimiento para la fabricación de láminas:

Se utilizó una solución de almidón 5% w/v en agua a 90° agitándose con un agitador magnético a 400 rpm. Luego, se agregó 1.5 ml de HCl a la mezcla y se mezcló durante 10 minutos adicionales, con el objetivo de reducir el pH a 2, después se agregó NaOH con el objetivo de subir el pH a 10. Luego, se agregó 10% en peso de glicerol a la mezcla y se mezcló durante 10 minutos adicionales. Dicha mezcla se vertió en moldes tipo placa de Petri. Para luego ser colocado dentro de un horno a 40° por 72 horas.

Finalmente obtenemos láminas como se muestra en la figura 31.

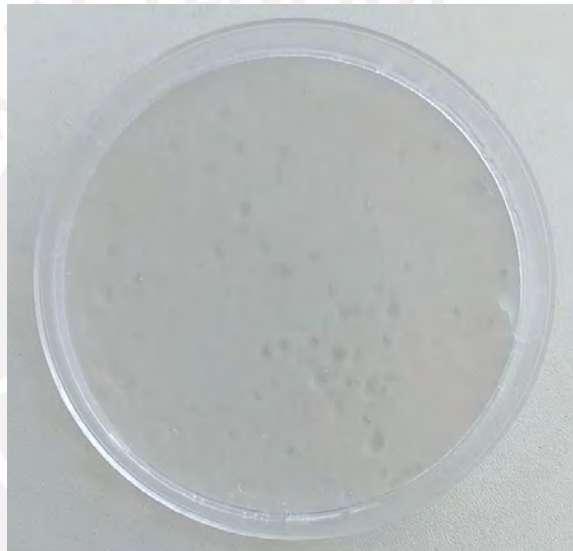


Figura 31: Imagen representativa de la lámina de almidón

2.3. Ensayos de tracción a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros

Para caracterizar las propiedades mecánicas de las láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros, se realizó un ensayo de tracción con el equipo ESM Mark-10 (Figura 32) realizando las mediciones con el software MESUR Lite.



Figura 32: Maquina de ensayos a tracción ESM Mark-10

2.4. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros

Para caracterizar las propiedades mecánicas de las láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros, se realizó un ensayo de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) a las muestras tomadas de las láminas triboeléctricas. Este ensayo se realizó con el equipo Spectrum Two de la marca PerkinElmer (Figura 33).



Figura 33: Spectrum Two PerkinElmer

2.5. Fabricación de prototipos con láminas triboeléctricas sintéticas

En este estudio se empezó fabricando prototipos con láminas triboeléctricas sintéticas para medir su potencial y comparar con data recolectada por distintos autores para comprobar la efectividad del prototipo creado. Se diseñó un modelo de TENG flexible, el cual se ve en la Figura 35, este modelo consta de una tira de material flexible de 22x4cm en la cual se colocan láminas de cobre de 4x4cm y láminas de polímeros con un cable entre ellas tal como se observa en la Figura 34.

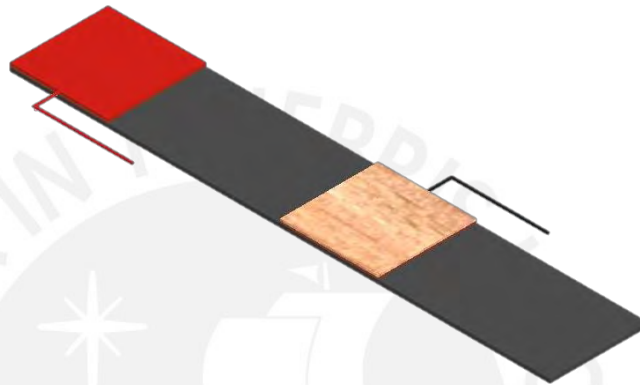


Figura 34: Prototipo representativo de TENG Flexible Estirado



Figura 35: Prototipo representativo TENG Flexible Cerrado

Este prototipo funciona aplicando una fuerza de compresión sobre la capa externa para generar el contacto entre las láminas triboeléctricas, como se observa en la figura 36, este contacto y separación generará un potencial eléctrico que será medido en los cables del prototipo

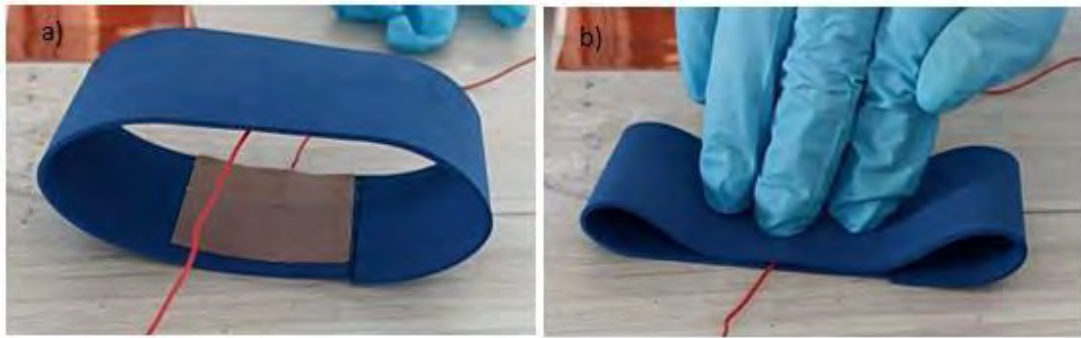


Figura 36: Prototipo de TENG Flexibles con recubrimiento de corrospum a) sin fuerza de compresión aplicada sobre las capas y b) con fuerza de compresión aplicada sobre las capas

Luego de tener el diseño del prototipo, se realizaron 4 prototipos de similares características, pero de diferentes materiales (Figura 37) para poder comparar entre ellos y obtener el prototipo con mejores prestaciones.

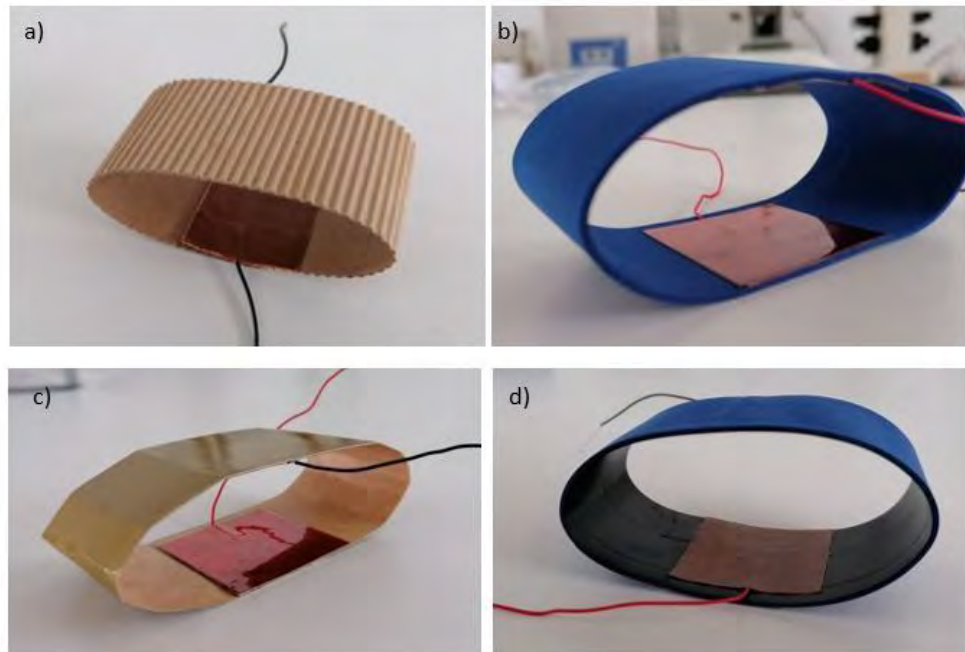


Figura 37: Imagen representativa de prototipos de TENG Flexibles a base de a) cartón corrugado, b) Corrospum, c) cartulina plastificada y d) Corrospum aislado

En la Tabla 3 se muestra a manera de resumen los materiales utilizados para la fabricación de los TENG flexibles, así como las cargas de las capas triboeléctricas y los valores de salida como voltaje a circuito abierto y corriente a corto circuito obtenidos a partir de la caracterización de los diferentes prototipos de TENGs flexibles. Para realizar las mediciones de voltaje a circuito abierto se empleó un osciloscopio de modelo Tektronix DPO 2022B.

Tabla 2: Tabla de prototipos de TENG con distintos recubrimientos

Función	Material	Carga de Superficie	Dimensiones	Espesor
TENG A				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	Kapton®	positivo	4x4 cm	0.171
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Cartulina corrugada		4.5x22cm	1.5
TENG B				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	Kapton®	positivo	4x4 cm	0.171
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5
TENG C				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	Kapton®	positivo	4x4 cm	0.171
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Cartulina plastificada		4.5x22cm	1.5
TENG D				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	Kapton®	positivo	4x4 cm	0.171
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum aislado con cinta negra		4.5x22cm	1.5

A partir de los resultados obtenidos seleccionamos el TENG B ya que posee los mejores resultados en las pruebas de medición de voltaje (Ver capítulo 3), y el material de recubrimiento permite una recuperación si deformación permanente.

2.6. Fabricación de prototipos con láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros

A partir del prototipo anterior, observando los resultados obtenidos, se realizó el cambio de las láminas triboeléctricas por láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros (Figura 38) para observar y comparar los resultados en contraste a los obtenidos en la sección anterior



Figura 38: Imagen representativa de prototipo de TENG fabricado con lámina de biopolímero

Utilizaremos las láminas comerciales en combinación con una lámina de biopolímero y así obtener una comparación de pares triboeléctricos de diferentes cargas y tendencias.

2.6.1. Tabla de prototipos

- **Prototipos con Teflón®:**

Tabla 3: Tabla de prototipos con láminas de Teflón® y láminas de biopolímeros

Función	Material	Carga de Superficies	Dimensiones	Espesor (mm)
TENG 1				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	Carragenina	positivo	4x4 cm	0.064
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5
TENG 2				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	Almidón	positivo	4x4 cm	0.45
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5
TENG 3				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	EPS cushuro	positivo	4x4 cm	0.054
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5
TENG 4				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Teflón®	negativo	4x4 cm	
Lámina triboeléctrica 2	Ulvan	positivo	4x4 cm	0.064
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5

- **Prototipos con kapton:**

Tabla 4: Tabla de prototipos con láminas de Kapton® y láminas de biopolímeros

Función	Material	Carga de Superficies	Dimensiones	Espesor (mm)
TENG 5				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Kapton®	negativo	4x4 cm	0.171
Lámina triboeléctrica 2	Carragenina	positivo	4x4 cm	0.067
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5
TENG 6				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Kapton®	negativo	4x4 cm	0.171
Lámina triboeléctrica 2	Almidón	positivo	4x4 cm	0.473
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5
TENG 7				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Kapton®	negativo	4x4 cm	0.171
Lámina triboeléctrica 2	EPS cushuro	positivo	4x4 cm	0.0596
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5
TENG 8				
Electrodo 1	Cobre	positivo	4x4 cm	0.013
Lámina triboeléctrica 1	Kapton®	negativo	4x4 cm	0.171
Lámina triboeléctrica 2	Ulvan	positivo	4x4 cm	0.096
Electrodo 2	Cobre	negativo	4x4 cm	0.013
Recubrimiento	Corrospum		4.5x22cm	1.5

2.7. Caracterización de prototipos

En este estudio caracterizamos los prototipos creados anteriormente realizando mediciones de voltaje generado a través de un tiempo determinado y voltaje pico generado por el TENG esta medición será realizada con el osciloscopio Tektronix DPO2022B (Figura 39).



Figura 39: Osciloscopio Tektronix DPO2022

Se realizarán 2 mediciones una medición será realizada directamente al osciloscopio, mientras que la otra medición se realizará en un circuito (Figura 40) el cual incluye un puente de diodos como rectificador de voltaje para convertir el voltaje negativo a positivo tal como se puede ver en el esquema de la Figura 41.



Figura 40: TENG conectado al puente de diodos

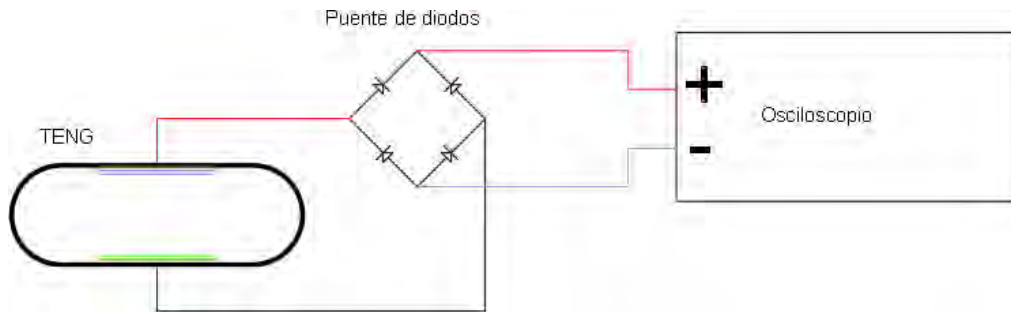


Figura 41: Representación esquemática del puente de diodos rectificador conectado a un TENG.



CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ensayos de tracción a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros

En la presente sección se analizarán las propiedades iniciales de las láminas triboeléctricas fabricadas a partir de biopolímeros.

3.1.1. Ensayo en láminas de carragenina

Las propiedades mecánicas de la carragenina se evaluaron con el fin de determinar los valores del módulo de Young. En la Figura 42 se muestra la imagen representativa de la curva esfuerzo deformación de las láminas obtenidas.



Figura 42: Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de Carragenina

A partir de la curva podemos observar las zonas elásticas y plástica del material, con un esfuerzo máximo de 8 MPa y una deformación 2% en la zona elástica, mientras que, a partir de 10 MPa, el material empieza a entrar a la zona plástica logrando una deformación de hasta 38.33% con un esfuerzo máximo de hasta 26.51 MPa. Se observa que las láminas tienen un comportamiento elástico y una alta resistencia a la tracción esto debido a que la carragenina producida a partir de *Chondracanthus chamissoi* está compuesta por carragenina de tipo iota y kappa por lo que tiene propiedades asociadas a este tipo de compuestos (flexibilidad y resistencia respectivamente).

3.1.2. Ensayo en láminas de Almidón

Las propiedades mecánicas del almidón se evaluaron con el fin de determinar los valores del módulo de Young. En la Figura 43 se muestra la imagen representativa de la curva esfuerzo deformación de las láminas obtenidas.

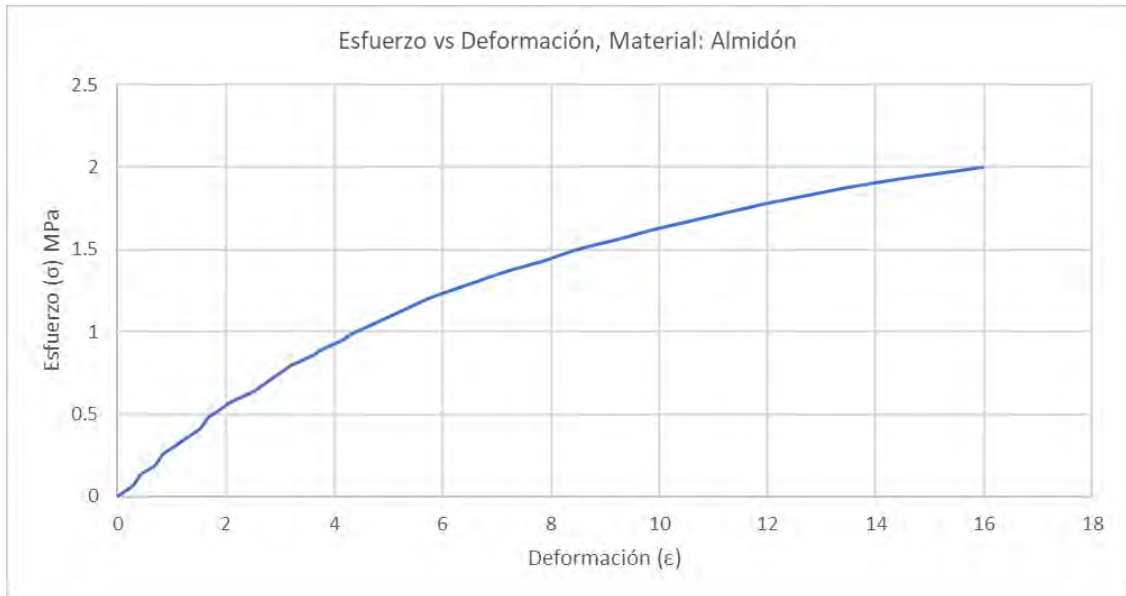


Figura 43: Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de Almidón

A partir de la curva podemos observar las zonas elásticas y plástica del material, con un esfuerzo máximo de 0.5 MPa y una deformación 1% en la zona elástica, mientras que, a partir de 1.1 MPa, el material empieza a entrar a la zona plástica logrando una deformación de hasta 15.42% con un esfuerzo máximo de hasta 2.04 MPa. Este material tiene poca resistencia y es muy plástico con pocas capacidades de recuperación de forma, esto debido al glicerol agregado el cual hace que la plastificación del almidón sea elevada y reduzca sus propiedades mecánicas a cambio de una mayor flexibilidad, tal como es mencionado en el estudio de Torres et al. (2011)

3.1.3. Ensayo en láminas de EPS

Las propiedades mecánicas de la carragenina se evaluaron con el fin de determinar los valores del módulo de Young. En la Figura 44 se muestra la imagen representativa de la curva esfuerzo deformación de las láminas obtenidas.

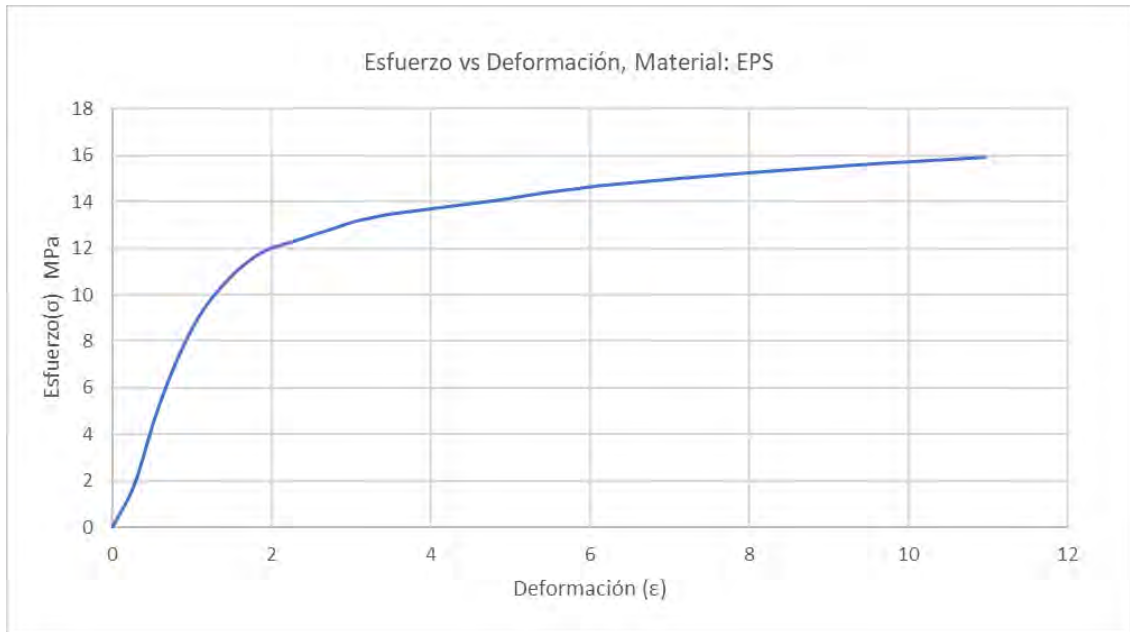


Figura 44: Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de EPS

A partir de la curva podemos observar las zonas elásticas y plástica del material, con un esfuerzo máximo de 10 MPa y una deformación 1.8% en la zona elástica, mientras que, a partir de 12 MPa, el material empieza a entrar a la zona plástica logrando una deformación de hasta 16.11% con un esfuerzo máximo de hasta 6.40 MPa. Se observa que este material tiene un comportamiento elástico y una alta resistencia a la tracción esto debido a que el EPS producido a partir del *Nostoc*, forma una red de cadenas de polisacáridos que aumentan la resistencia de este material. (Torres et al., 2011)

3.1.4. Ensayo en láminas de Ulvan

Las propiedades mecánicas del ulvan se evaluaron con el fin de determinar los valores del módulo de Young. En la Figura 45 se muestra la imagen representativa de la curva esfuerzo deformación de las láminas obtenidas.

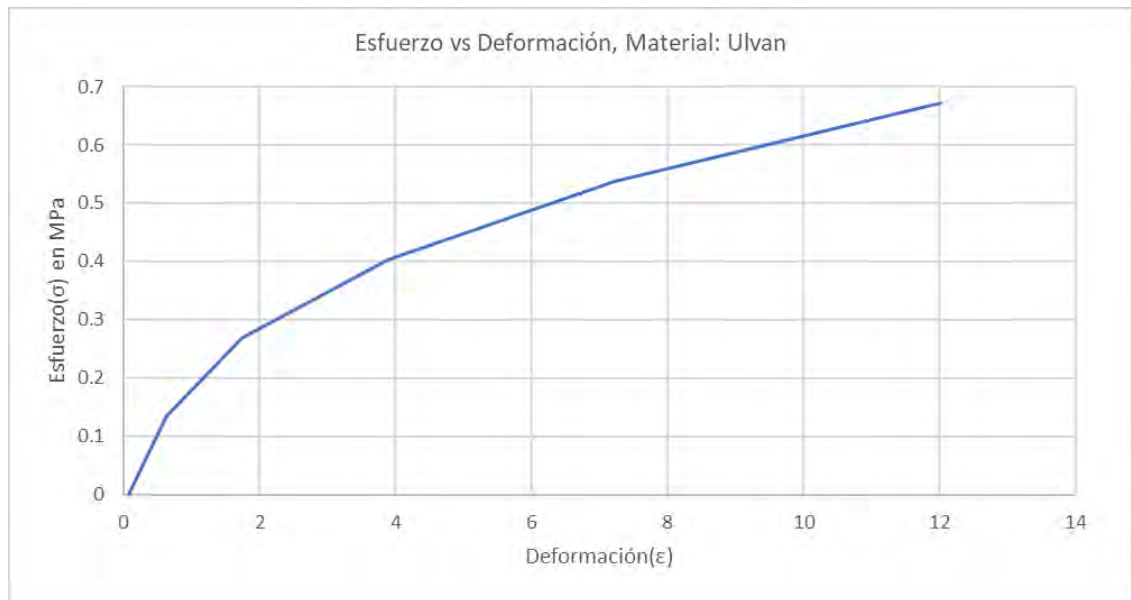


Figura 45: Gráfica representativa Esfuerzo vs Deformación de láminas de Ulvan

A partir de la curva podemos observar la zona elástica y plástica del material, con un esfuerzo máximo de 0.28 MPa y una deformación 1.7% en la zona elástica, mientras que, a partir de 0.3 MPa, el material empieza a entrar a la zona plástica logrando una deformación de hasta 25.67 % con un esfuerzo máximo de hasta 1.85 MPa. Este material tiene poca resistencia a la tracción y es muy plástico con pocas capacidades de recuperación de forma. Esto puede estar asociado a la conformación de las cadenas del ulvan. Debido a que el proceso de extracción fue empleando una solución alcalina a pH 13, los polisacáridos del ulvan tienen una conformación más abierta, por lo tanto, los materiales basados en ulvanos tendrían una zona plástica más predominante. (Kidgell et al., 2019),

En la siguiente tabla tendremos los resultados resumidos de los ensayos realizados a las láminas triboeléctricas fabricadas a partir de biopolímeros.

Tabla 5: Tabla de resultados de ensayos de tracción

Material	Espesor	Esfuerzo máximo (σ) MPa	Deformación (ϵ)	Módulo de Young (E) MPa
Almidón	$0.3193 \pm 2.4 \times 10^{-2}$	$1.93 \pm 8.72 \times 10^{-2}$	14.01 ± 2.02	$0.247 \pm 2.66 \times 10^{-2}$
EPS	$0.0385 \pm 4.5 \times 10^{-3}$	13.44 ± 1.73	11.25 ± 3.61	5.15 ± 0.97
Ulvan	$0.072 \pm 4 \times 10^{-3}$	1.09 ± 0.67	21.06 ± 6.51	0.247 ± 0.18
Carragenina	$0.066 \pm 6.04 \times 10^{-3}$	23.04 ± 2.4	33.06 ± 5.55	5.538 ± 0.45



3.2. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier a láminas triboeléctricas basadas en biopolímeros

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados a las diferentes láminas desarrolladas:

3.2.1. FTIR en láminas de carragenina

El espectro obtenido de las láminas de Carragenina mediante FT-IR, se muestra en la figura 46. En esta gráfica podemos observar una señal de banda ancha de alrededor de 3390 cm^{-1} correspondientes a la vibración por estiramiento del grupo de hidroxilos (O-H), también podemos observar alrededor 2924 cm^{-1} una señal débil correspondiente a enlaces de carbono e hidrogeno (C-H). Los picos característicos de la carragenina se muestran en 1639 cm^{-1} correspondiente al grupo C=O, en 1219 cm^{-1} correspondiente al grupo éster-sulfato y 927 cm^{-1} correspondiente al grupo D-galactosa, característico de la carragenina iota.

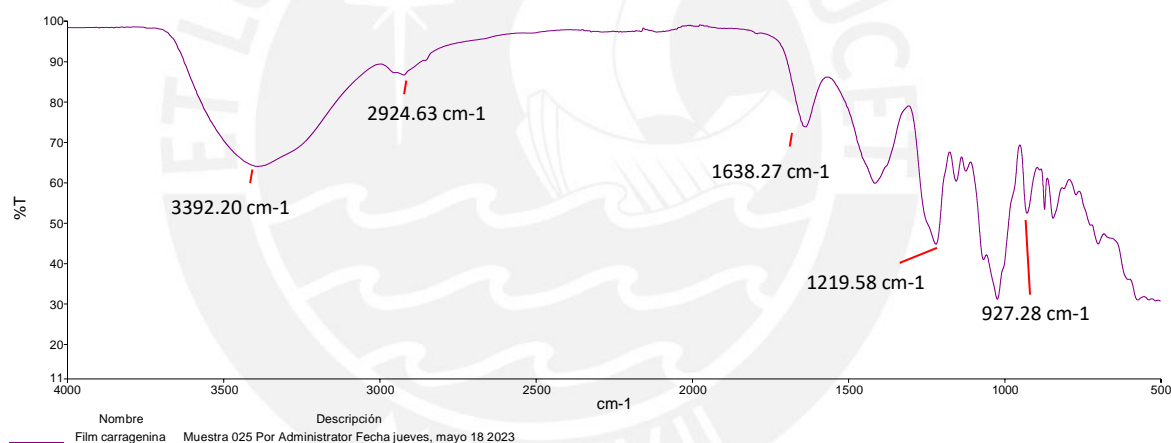


Figura 46: Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de carragenina

3.2.2. FTIR en láminas de almidón

El espectro obtenido de las láminas de Almidón mediante ATR-FTIR, se muestra en la figura 47. En esta gráfica podemos observar una señal de banda ancha de alrededor de 3272 cm^{-1} correspondientes a la vibración por estiramiento del grupo de hidroxilos (O-H). También existe un ancho de banda cerca a los 2929 cm^{-1} correspondiente a la vibración por estiramiento simétrico y asimétrico del enlace C-H. Los picos que se encuentran alrededor de 1646 cm^{-1} se relacionan con la torsión y estiramiento del grupo O-H y C=O. Los picos mostrados entre los 1151 cm^{-1} y los 999 cm^{-1}

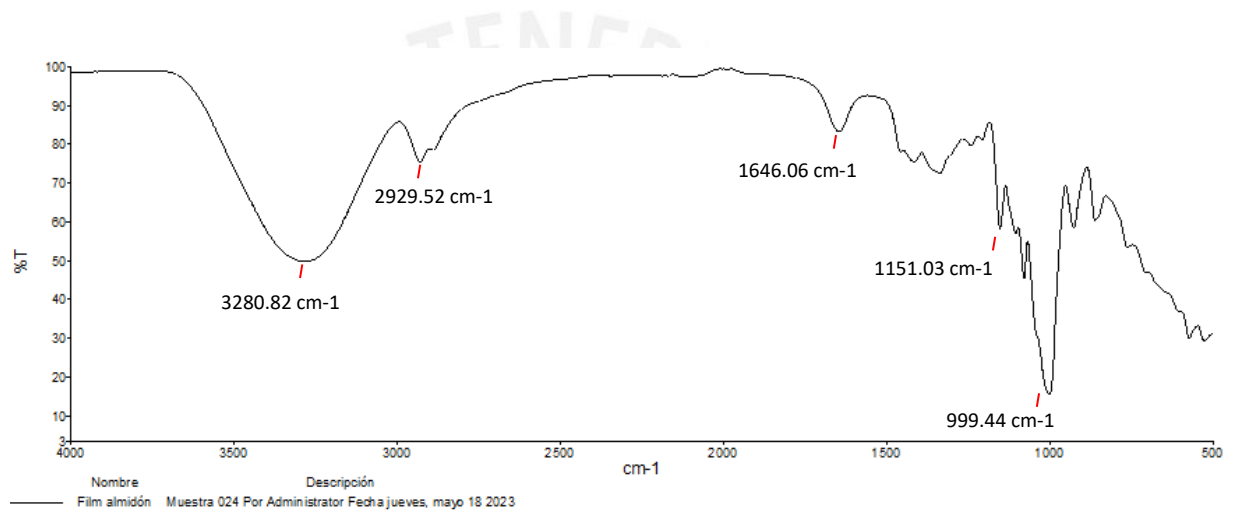


Figura 47: Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de almidón

3.2.3. FTIR en láminas de EPS

El espectro obtenido de las láminas de EPS mediante ATR-FTIR, se muestra en la figura 48. En esta gráfica podemos observar una señal de banda ancha de alrededor de 3270 cm^{-1} correspondientes a la presencia de grupos hidroxilo. Los picos se encuentran alrededor de 1600 cm^{-1} correspondientes a enlaces C=O de grupos carboxilos, mostrando la presencia de ácido glucurónico, y en 1026 cm^{-1} corresponde a vibraciones de enlaces C-O-C correspondiente al ciclo de glucosa. Los picos que encontramos alrededor de 863 cm^{-1} se asigna a la presencia de unidades de glucopiranososa.

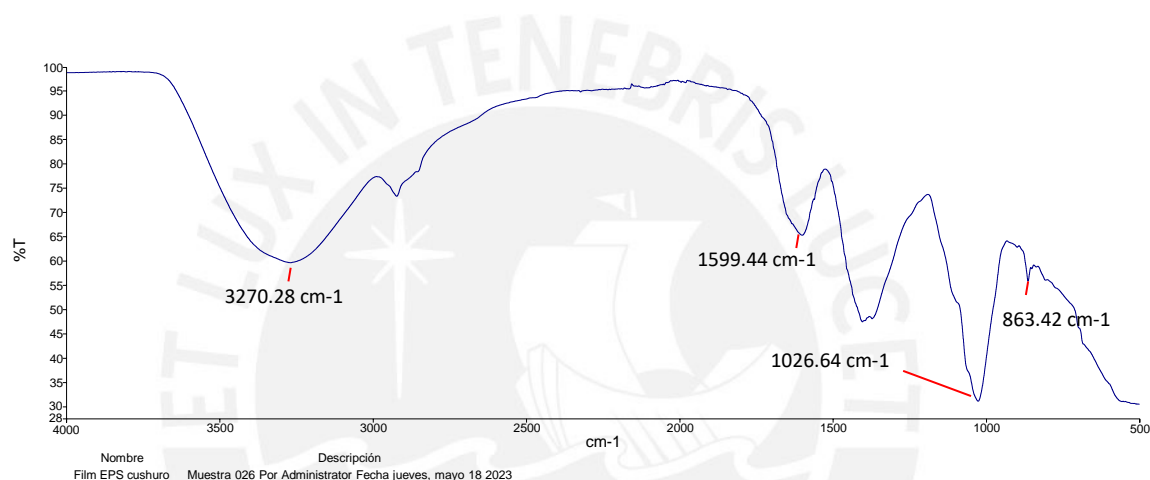


Figura 48: Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de EPS

3.2.4. FTIR en láminas de ulvan

El espectro obtenido de las láminas de Ulvan mediante FT-IR, se muestra en la figura 49. En esta gráfica podemos observar una señal de banda ancha de alrededor de 3280 cm^{-1} correspondientes a la vibración por estiramiento del grupo O-H. Los picos se encuentran alrededor de 1643 cm^{-1} y 1363 cm^{-1} se relacionan con la vibración de estiramiento asimétrico y simétrico del grupo carboxilo (-COO-) los picos que encontramos alrededor de 1219 cm^{-1} para todos los bioplásticos, se encuentra relacionado con la vibración de estiramiento del grupo éster-sulfato(S=O) característicos de polisacáridos sulfatados.

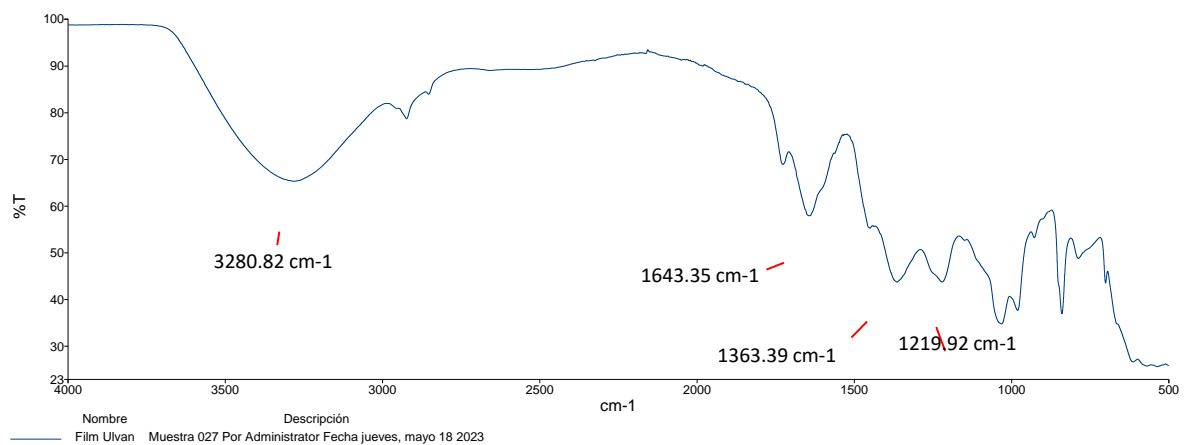


Figura 49: Gráfica representativa de resultado en ensayo FTIR de la lámina de Ulvan

3.3. Voltaje en circuito abierto de nanogenerador triboeléctrico usando láminas sintéticas

A partir de las pruebas, obtenemos unas gráficas de voltaje-tiempo en las cuales observamos el voltaje generado en forma de pico durante el contacto y durante la separación de las láminas triboeléctricas tal como se muestra en la Figura 50.

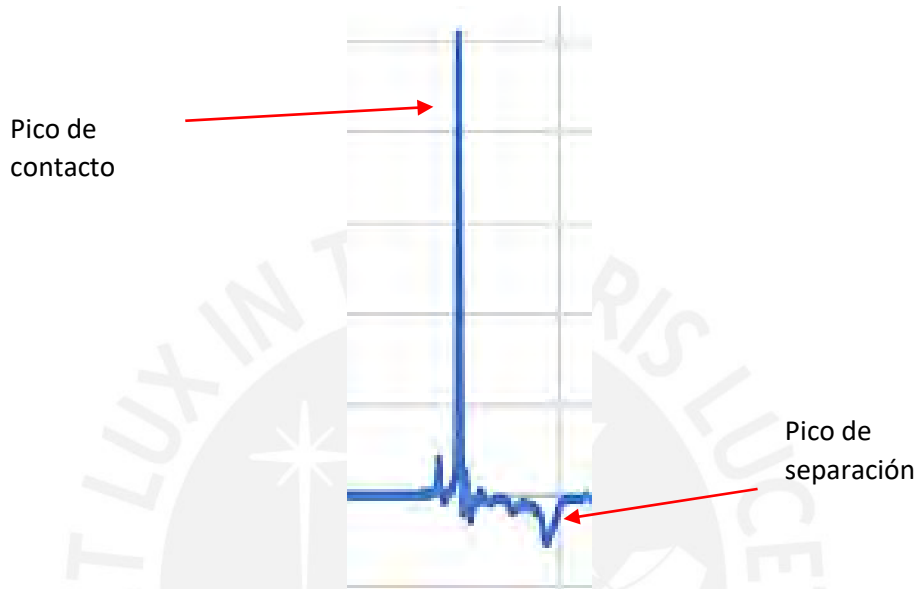


Figura 50: Gráfica representativa de picos generados por un TENG

Como resultados tenemos los siguientes gráficos de los 4 prototipos con diferentes recubrimientos:

- **TENG A):**

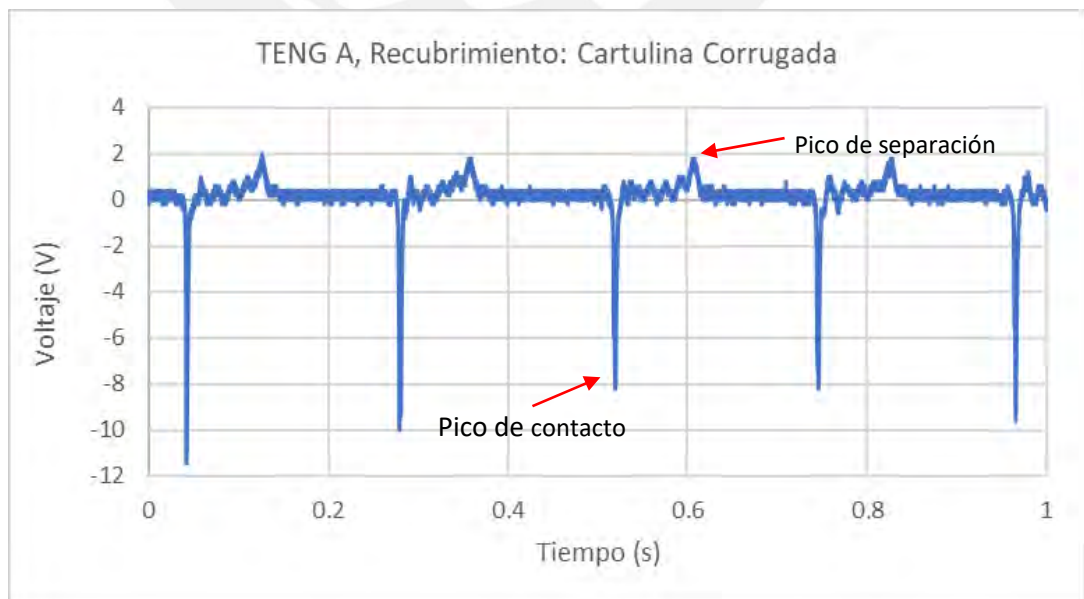


Figura 51: Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG A

- **TENG B):**

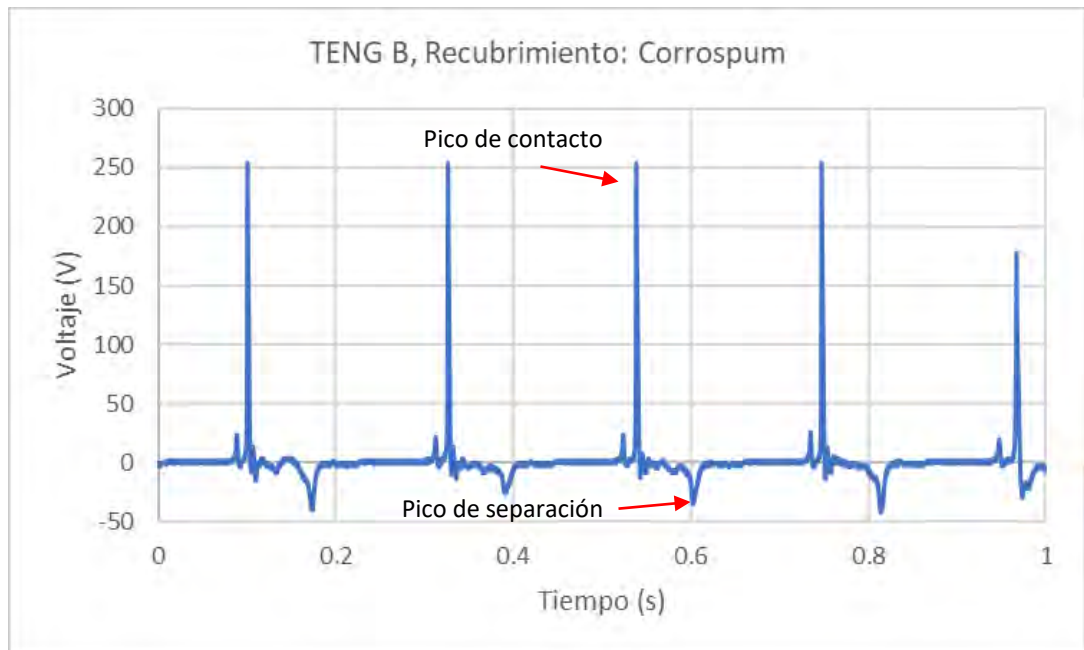


Figura 52: Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG B

- **TENG C):**

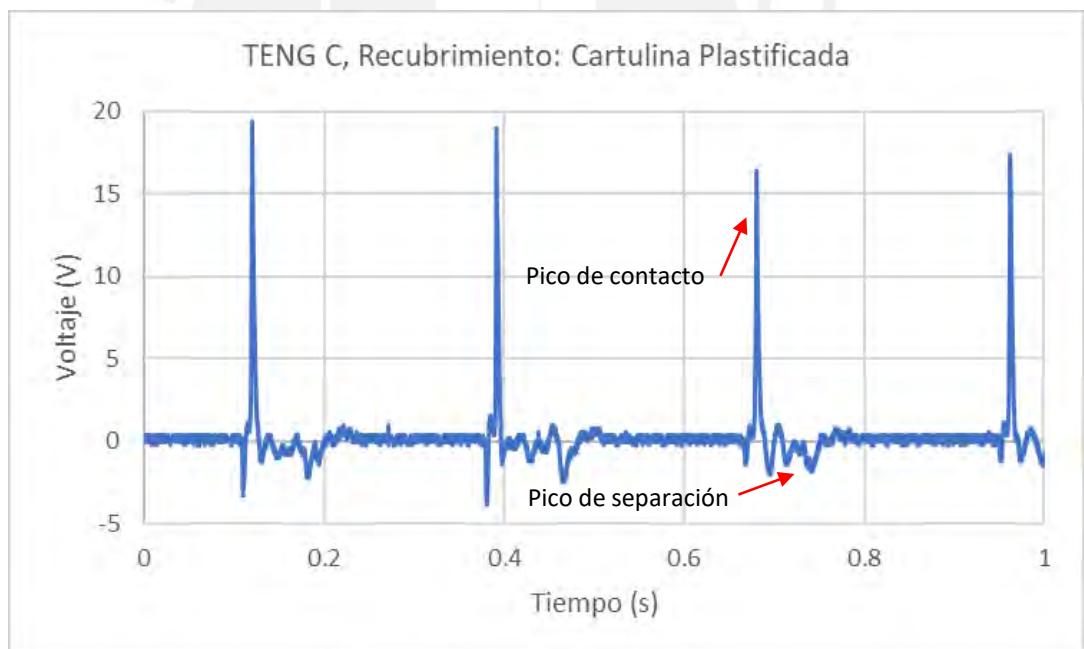


Figura 53: Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG C

TENG D):

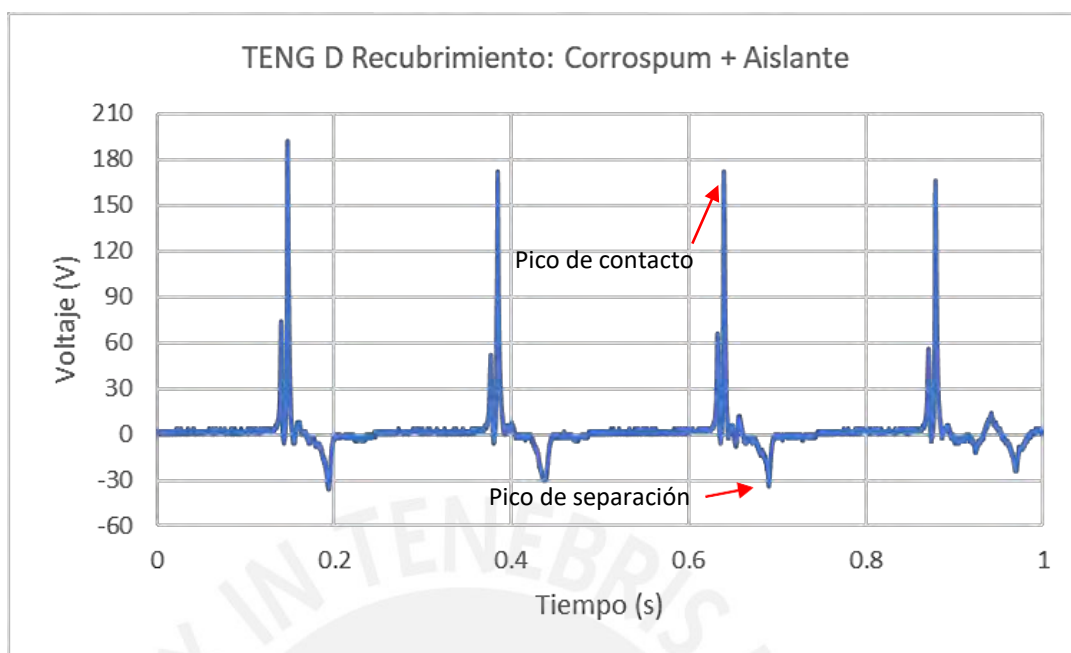


Figura 54: Imagen representativa Voltaje en el tiempo (1s) TENG D

La siguiente tabla muestra el resumen de los resultados obtenidos en los prototipos con láminas sintéticas:

Tabla 6: Tabla de prototipos con láminas sintéticas

Prototipo	Recubrimiento	Voltaje máximo (V)	Voltaje mínimo (V)
TENG A	Cartulina Corrugada	5	- 11.8
TENG B	Corrospum	>256	- 44
TENG C	Cartulina plastificada	23.6	- 5
TENG D	Corrospum + aislante	206	- 38

Como se puede observar en la tabla y en las Figuras 51-54, el TENG A tiene los picos invertidos, esto debido a la polaridad tomada en la medición el cual hace que los picos de contacto tomen valores negativos mientras que el de separación tome valores positivos. El TENG B es el que genera un mayor voltaje, aunque el TENG D posee resultados similares, el necesitar mayor cantidad de materiales (cinta Aislante) hace que sea un prototipo un poco más caro con un desempeño similar, por ello se seleccionó el diseño y materiales **del TENG B para realizar los prototipos con láminas triboeléctricas de bio polímeros como superficies activas.**

3.4. Voltaje en circuito abierto de nanogenerador triboeléctrico usando láminas basadas en biopolímeros

3.4.1. Medición de Voltaje en picos

- **Prototipos con Teflón®:**

- TENG 1

Se observa que el pico de separación invierte su voltaje negativo a positivo generando una superposición de cargas y un segundo pico pequeño. En este caso la lámina de carragenina se comporta como superficie cargada positivamente y la de teflón como superficie cargada negativamente.

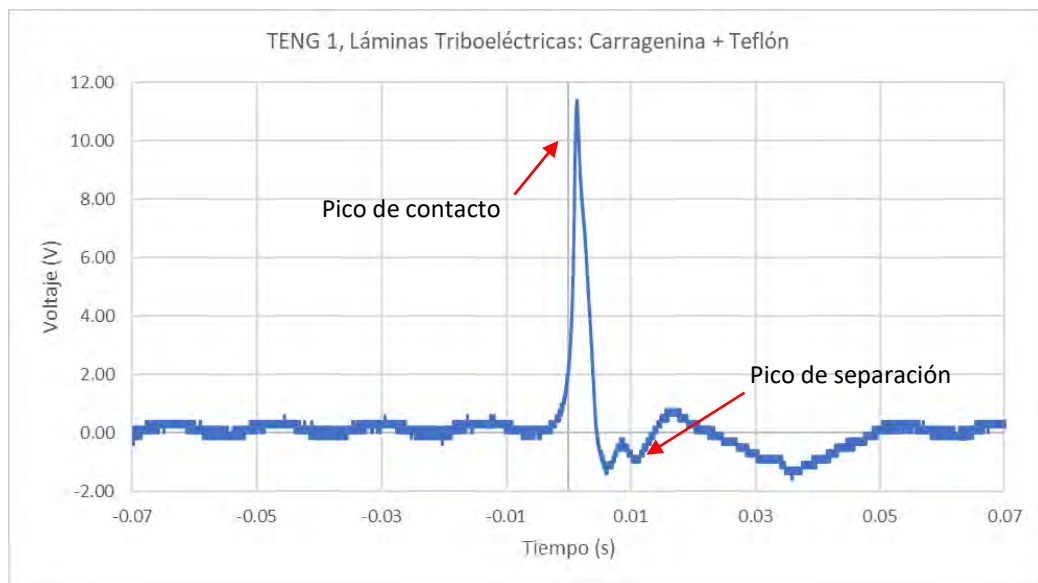


Figura 55: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 1

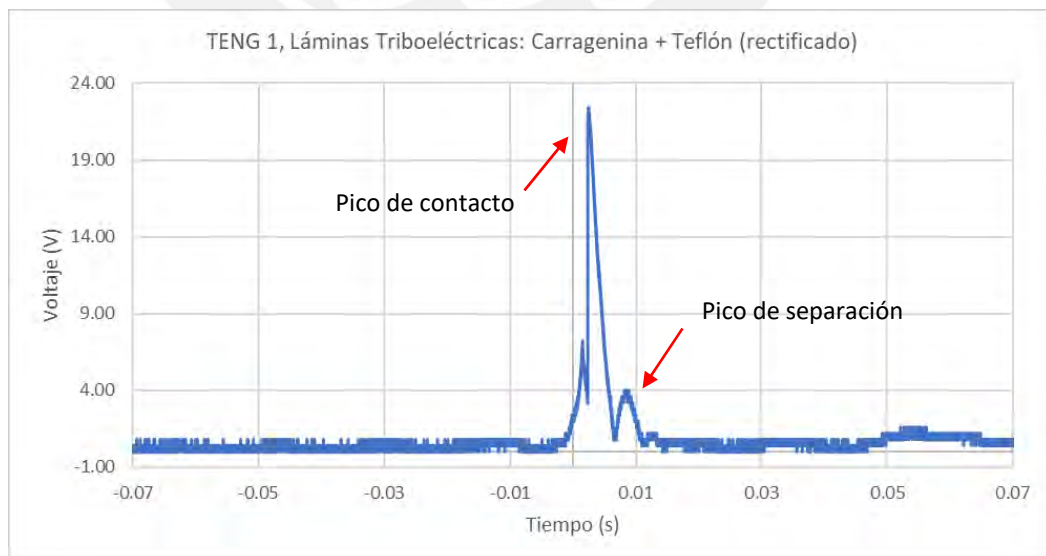


Figura 56 : Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 1 rectificado

o TENG 2

Se observa que los picos sin rectificar son irregulares, sin embargo, se observa que usando el rectificador estos picos irregulares se reducen y superponen su carga por lo que llega a un voltaje superior. En este caso la lámina de almidón se comporta como superficie cargada positivamente y la de teflón como superficie cargada negativamente.



Figura 57 : Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 2

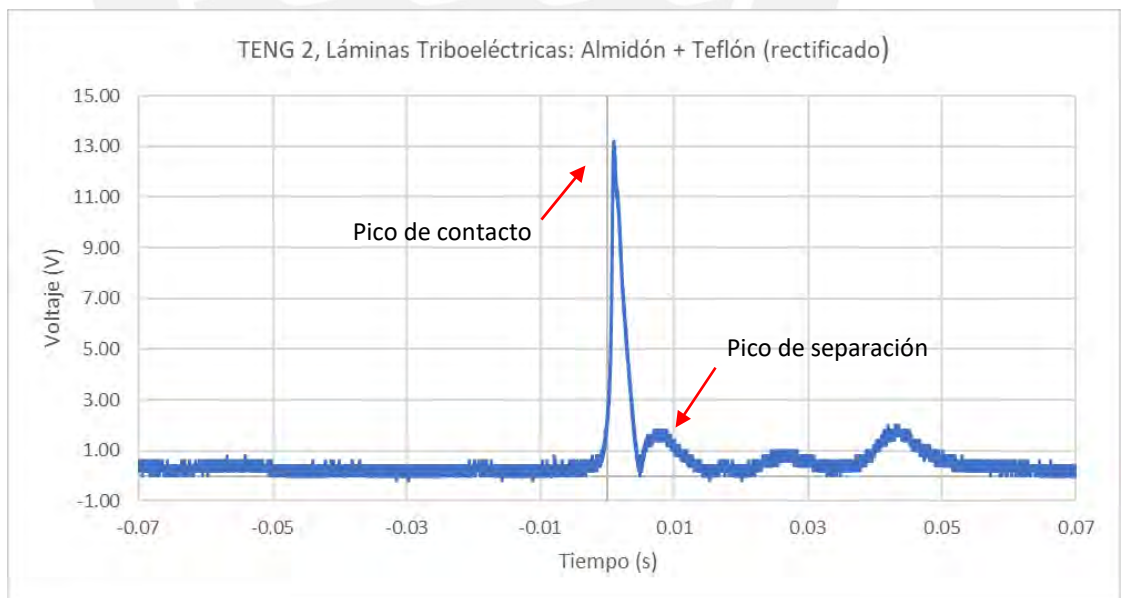


Figura 58: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 2 rectificado

o TENG 3

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, en este caso la carga no llega a superponerse, pero se genera un segundo pico grande (separación). En este caso la lámina de EPS se comporta como superficie cargada positivamente y la de teflón como superficie cargada negativamente.



Figura 59: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 3

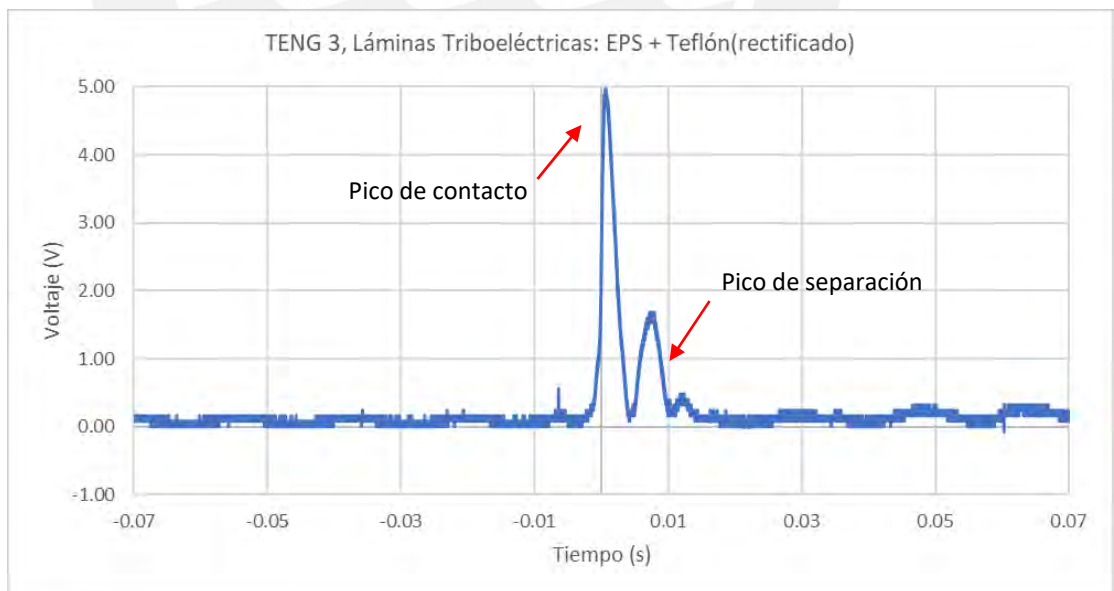


Figura 60: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 3 rectificado

o TENG 4

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, en este caso la carga no llega a superponerse, pero se genera un segundo pico grande (separación), en este caso la lámina de ulvan comportándose como superficie cargada positivamente y la de teflón como cargada negativamente.

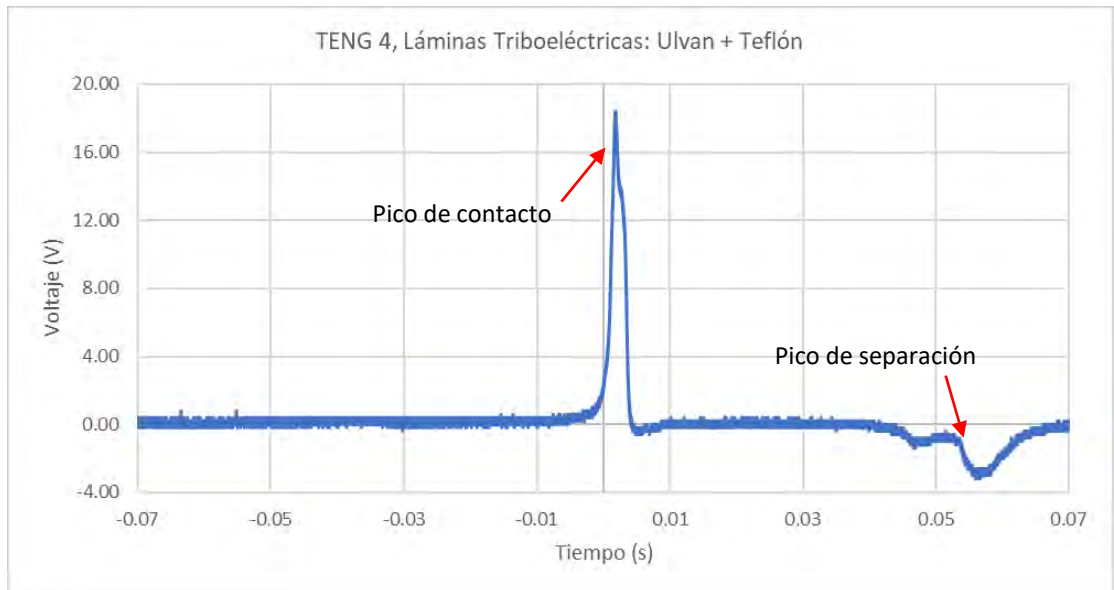


Figura 61: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 4

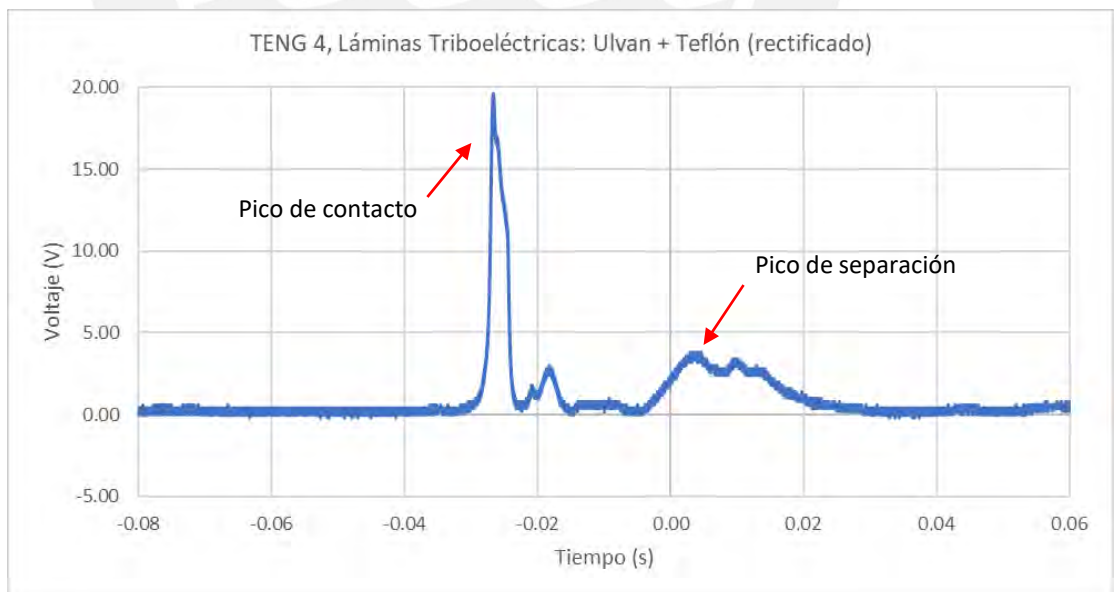


Figura 62: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 4 rectificado

- **Prototipos con Kapton®:**

- TENG 5

Se observa que la superposición de carga en este caso es mayor teniendo un pico de separación grande, se puede observar también unos pequeños picos al lado del pico de contacto, esto podría ser debido a la vibración a la hora de ejercer el contacto lo cual generó pequeños saltos. En este caso la lámina de carragenina se comporta como superficie cargada positivamente y la de kapton como superficie cargada negativamente. En comparación con las figuras 54-55, este par triboeléctrico genera una menor carga.

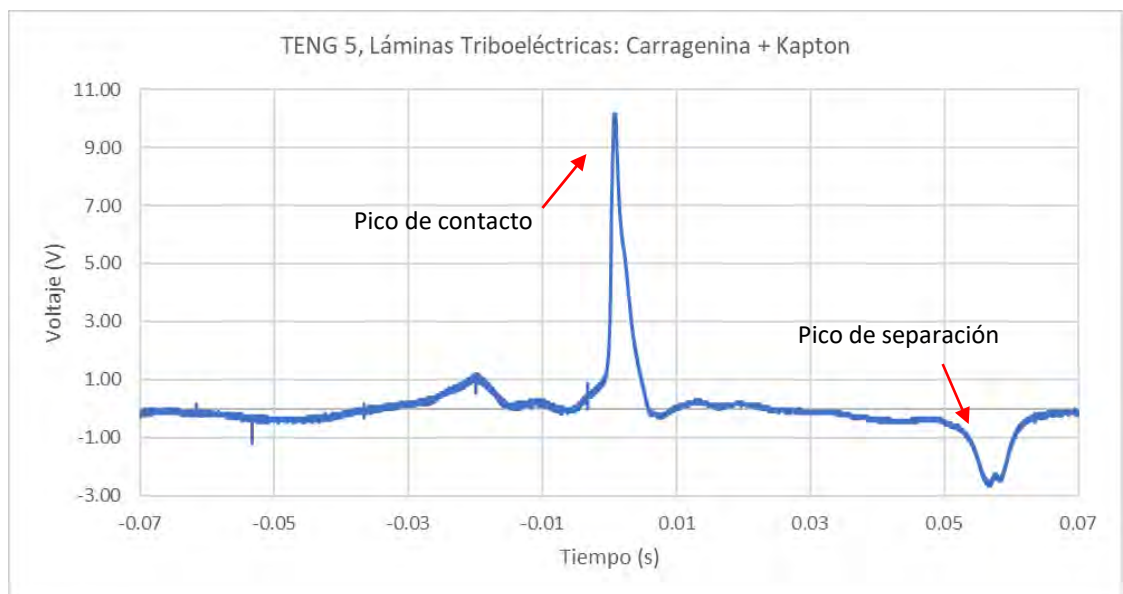


Figura 63: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 5

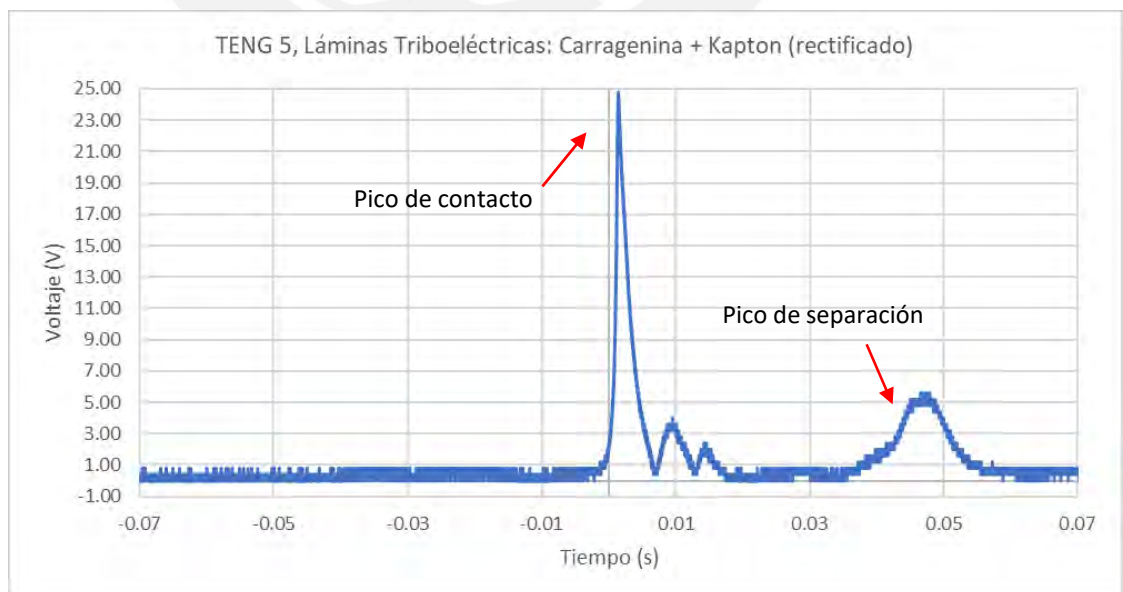


Figura 64: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 5 rectificado

o TENG 6

Se observa que usando el rectificador estos picos irregulares se reducen y superponen su carga por lo que llega a un voltaje superior, la lámina de almidón se comporta como superficie cargada positivamente y la de kapton como superficie cargada negativamente. En comparación con las figuras 56-57, este par triboeléctrico genera una mayor carga.

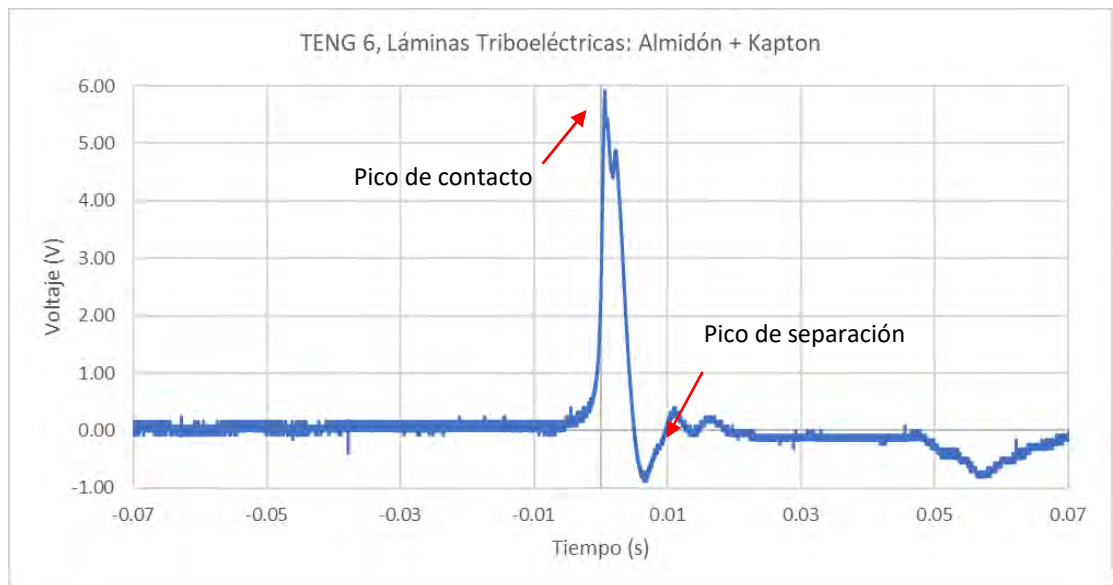


Figura 65: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 6

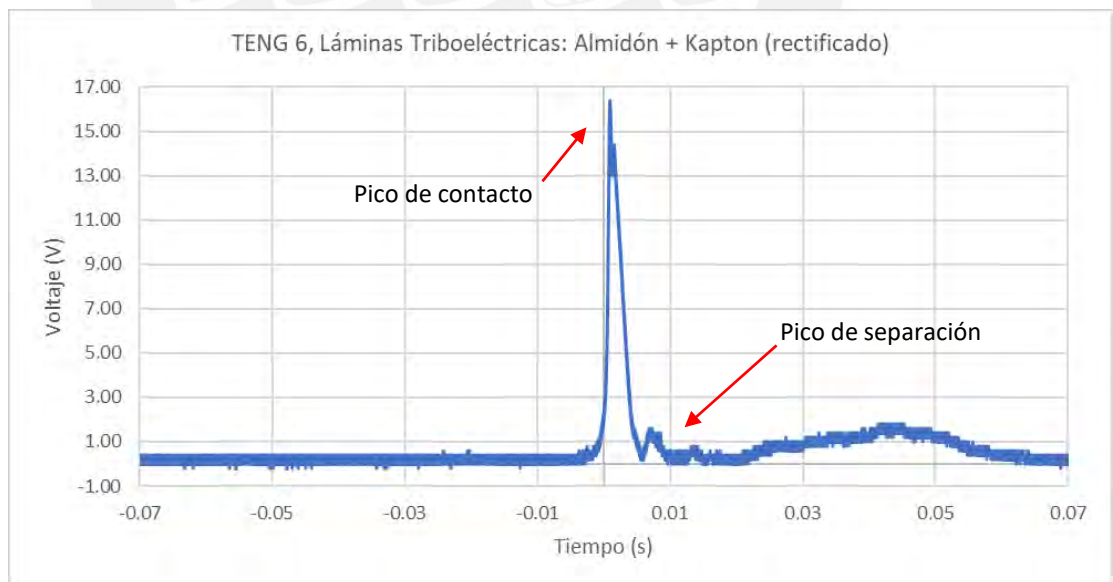


Figura 66: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 6 rectificado

o TENG 7

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, en este caso la carga se redujo en la medición, esto podría deberse a una toma de un pico menor, debido a la velocidad de muestreo del osciloscopio. En este caso la lámina de EPS se comporta como superficie cargada positivamente y la de kapton como superficie cargada negativamente. En comparación con las figuras 59-60, este par triboeléctrico genera una mayor carga.

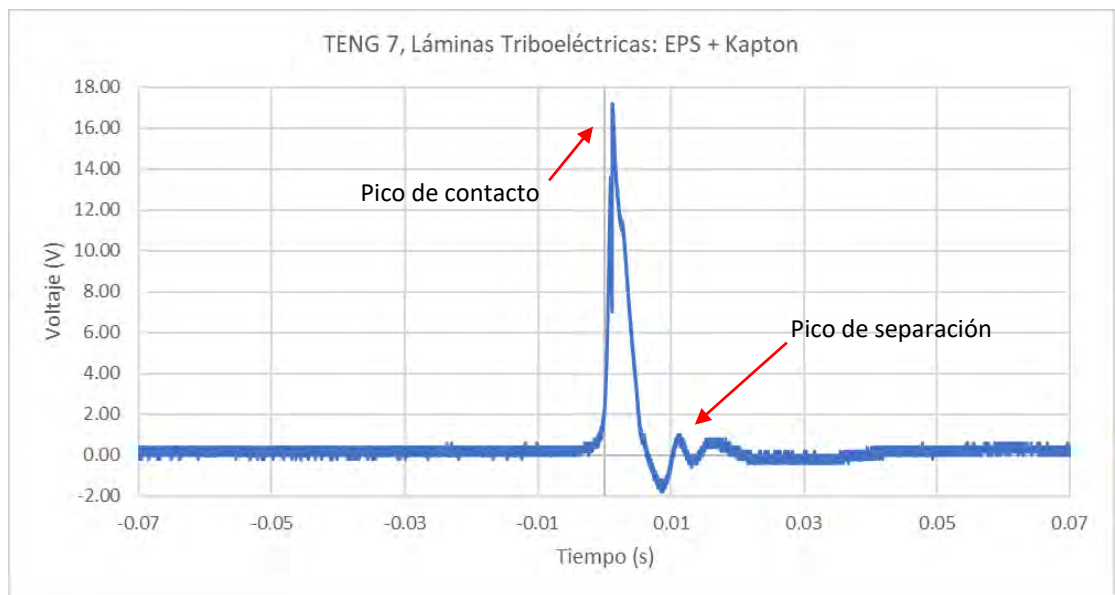


Figura 67: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 7

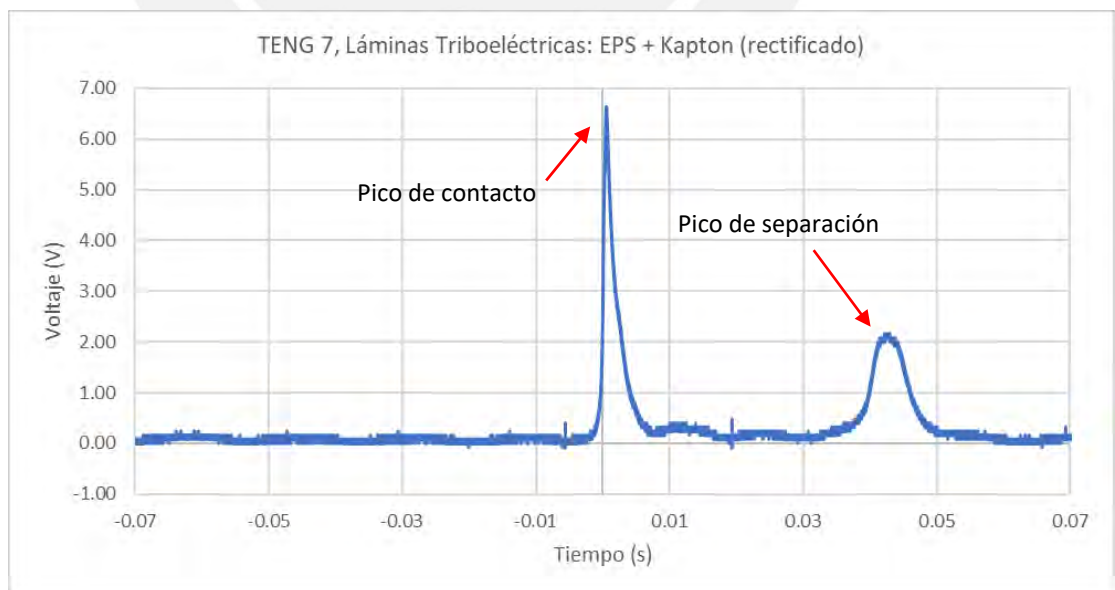


Figura 68: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 7 rectificado

o TENG 8

En este caso tenemos una onda con picos pequeños los cuales se concentran cuando es rectificado produciendo un pico mayor, esto debido a que el ulvan y el kapton poseen una tendencia similar a ganar o perder electrones y cuando sucede este efecto, las mediciones de picos son pequeñas y al azar.

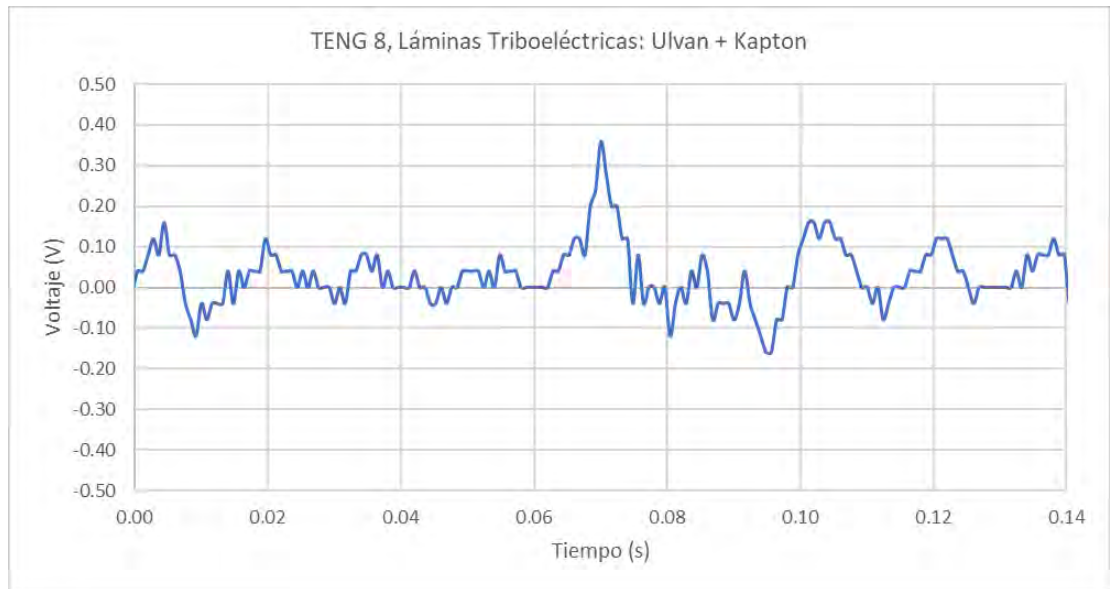


Figura 69: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 8

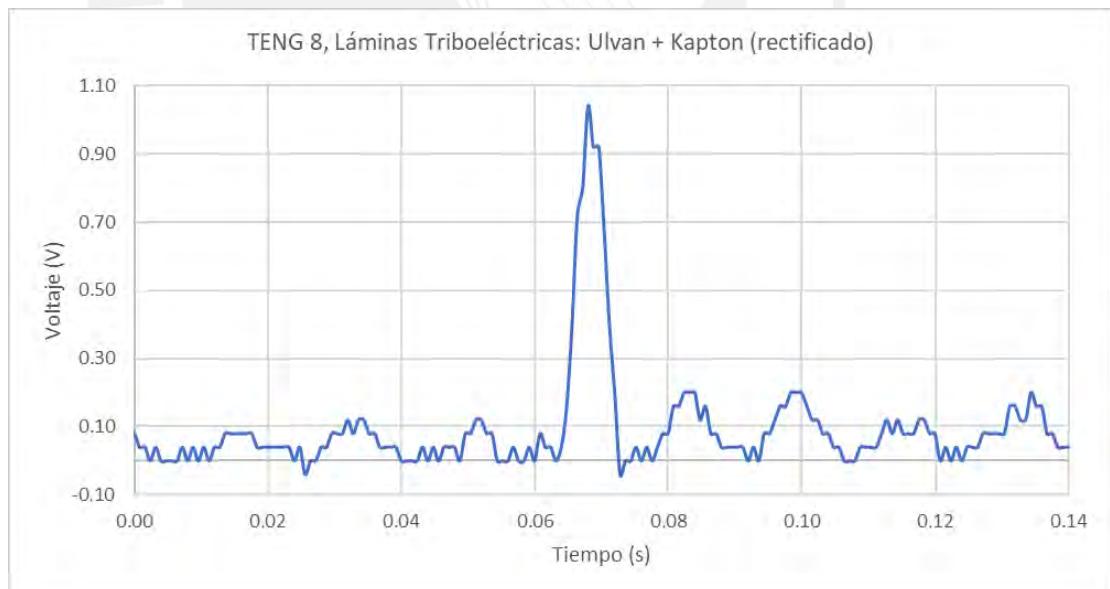


Figura 70: Imagen representativa del Voltaje pico en TENG 8 rectificado

En la siguiente tabla podemos observar un resumen de los valores obtenidos en la medición de voltaje en un pulso, podemos observar las gráficas de estas mediciones en las Figuras 55-70

Tabla 7: Resumen de resultados de medición de voltaje en picos

Prototipo	Biopolímero de lámina	Voltaje máximo (V)	Voltaje mínimo (V)	Voltaje máximo rectificado (V)	Voltaje mínimo rectificado (V)
Prototipos con lámina de Teflón®					
TENG 1	Carragenina	11.40	-1.4	37.20	-0.40
TENG 2	Almidón	3.52	-1.76	13.40	-0.40
TENG 3	EPS	4.96	-1.44	5.04	-0.32
TENG 4	Ulvan	18.6	-3.2	20.40	-0.40
Prototipos con lámina de Kapton®					
TENG 5	Carragenina	10.20	-2.72	24.8	-0.40
TENG 6	Almidón	6.00	-1.52	16.4	-0.40
TENG 7	EPS	19.60	-2.00	6.72	-0.40
TENG 8	Ulvan	0.35	-0.15	1.05	-0.01

A partir de estos resultados podemos observar que las mediciones con el circuito rectificado obtienen un mayor voltaje máximo en picos, esto se debe a que se aprecia un efecto de superposición del voltaje convertido, el cual aumenta la cantidad de voltaje máximo. También observamos que en efecto el voltaje mínimo se acerca a 0 en el circuito rectificado, teniendo un valor aproximado de -0.40 V debido al ruido que se obtiene en el osciloscopio.

Podemos observar también que el TENG 8 el cual tiene como láminas triboeléctricas el kapton y ulvan cuenta con el menor rendimiento de todas, mientras que por el contrario el TENG 1 el cual tiene como láminas triboeléctricas el teflón y carragenina, tienen el mejor desempeño en esta prueba.

3.4.2. Medición de Voltaje en el tiempo

- **Prototipos con Teflón®:**

- TENG 1

Podemos observar que la tendencia observada en la sección 3.4.1 se mantiene en este caso, y que se puede mantener en un tiempo determinado, en el caso de uso del rectificador, observamos picos más elevados, pero no constantes.

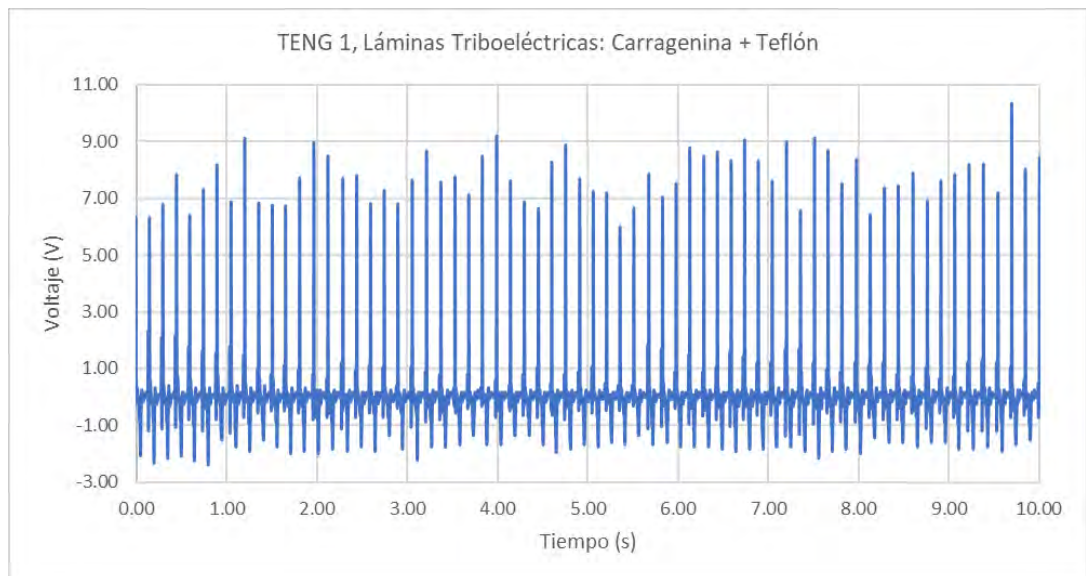


Figura 71: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 1

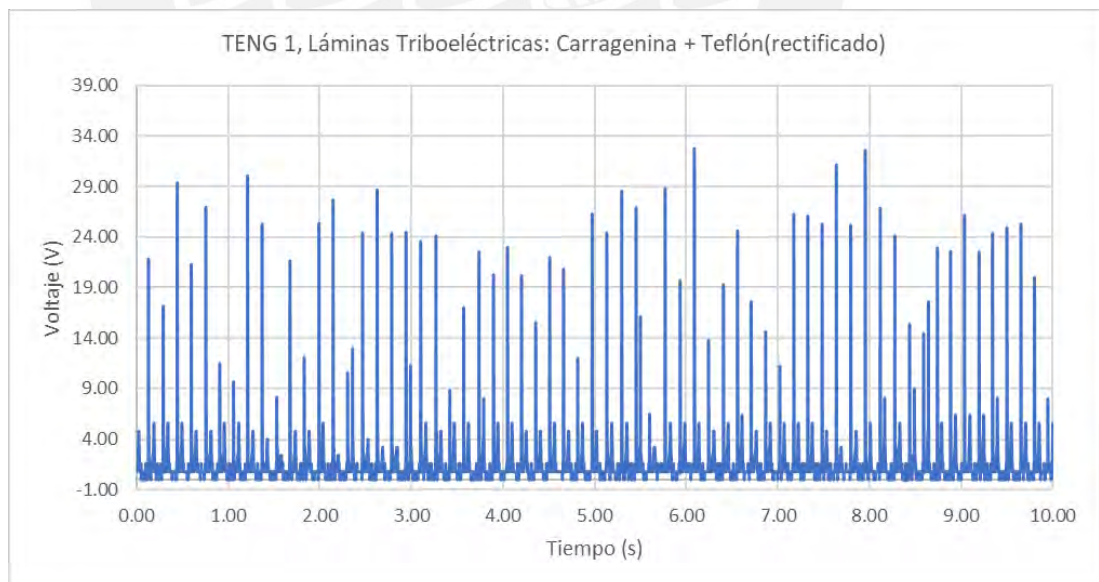


Figura 72: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 1 rectificado

o TENG 2

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, y la carga se superpone en algunos picos, generando una carga mayor, aunque también se generan picos de separación cerca a los picos de contacto.

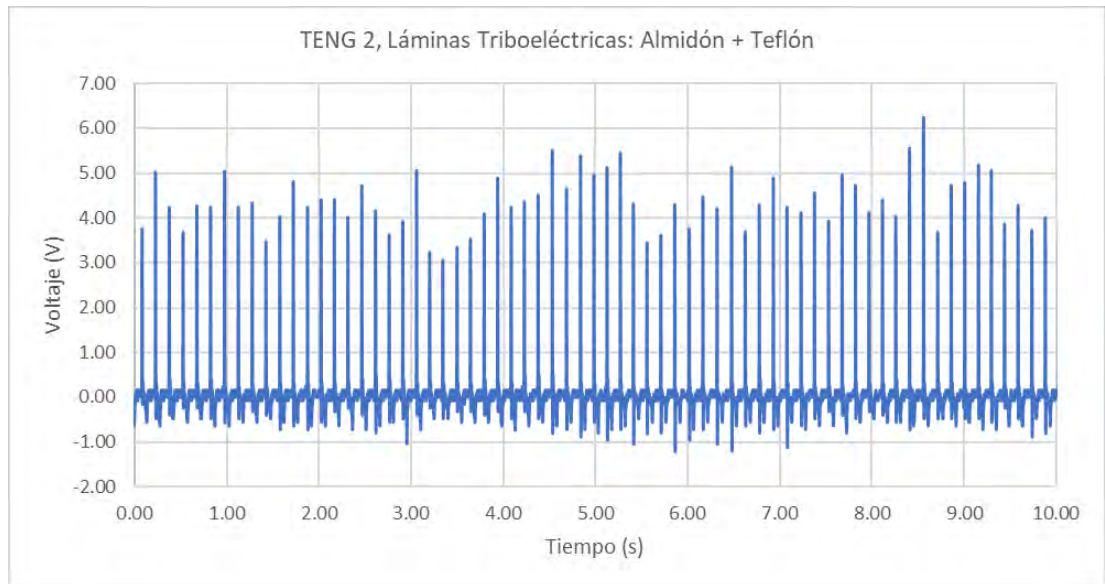


Figura 73: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 2

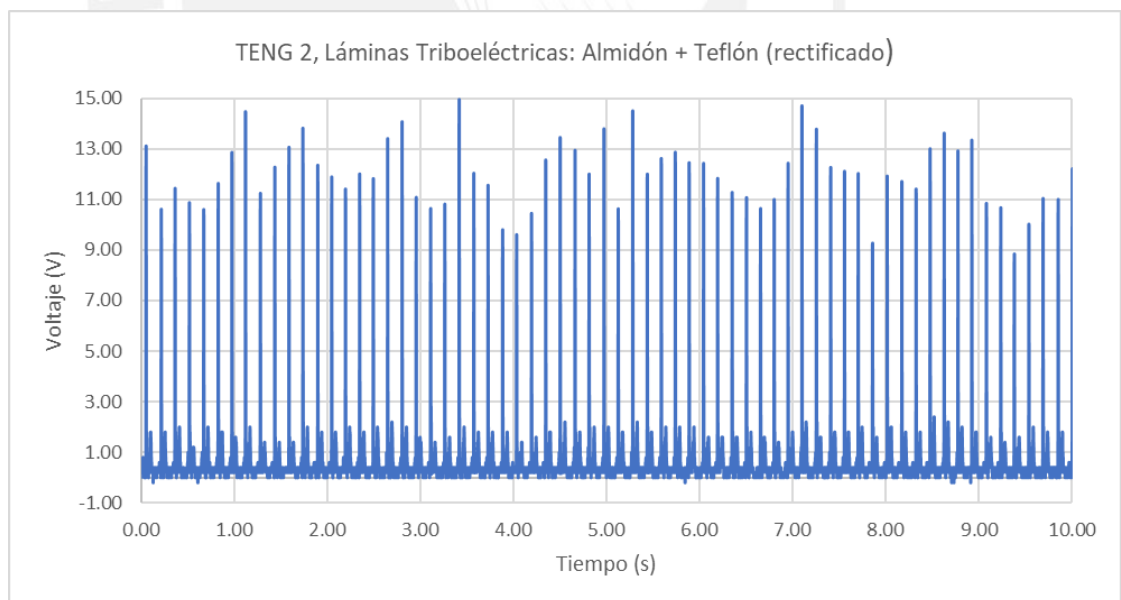


Figura 74: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo en TENG 2 rectificado

o TENG 3

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, en este caso la carga no llega a superponerse, pero se generan picos de separación cerca a los picos de contacto.

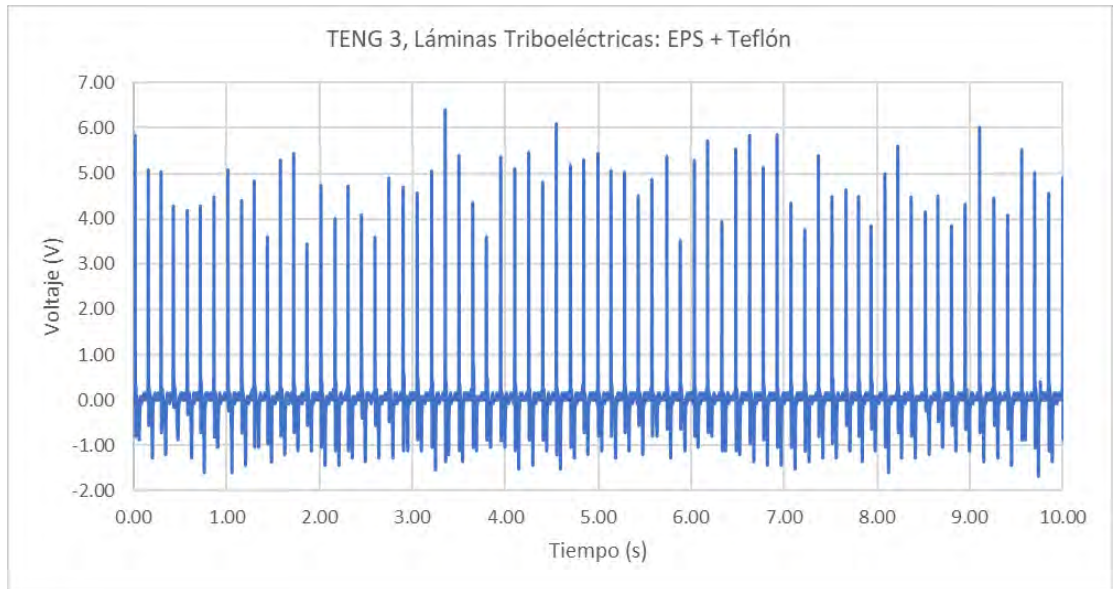


Figura 75: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 3

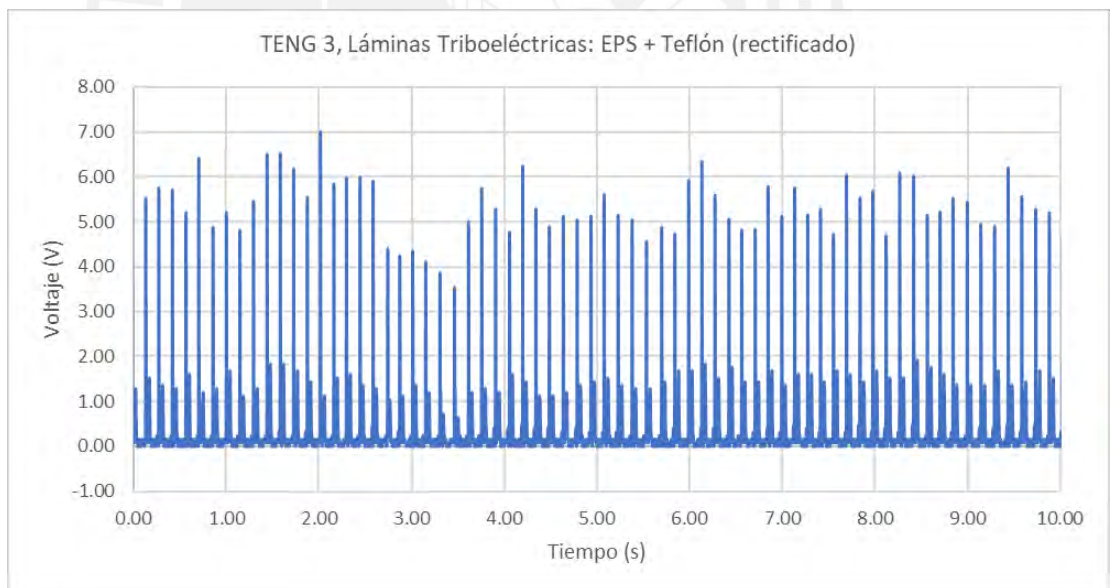


Figura 76: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 3 rectificado

o TENG 4

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, y la carga se superpone en algunos picos, generando una carga mayor, aunque también se generan picos de separación cerca a los picos de contacto.

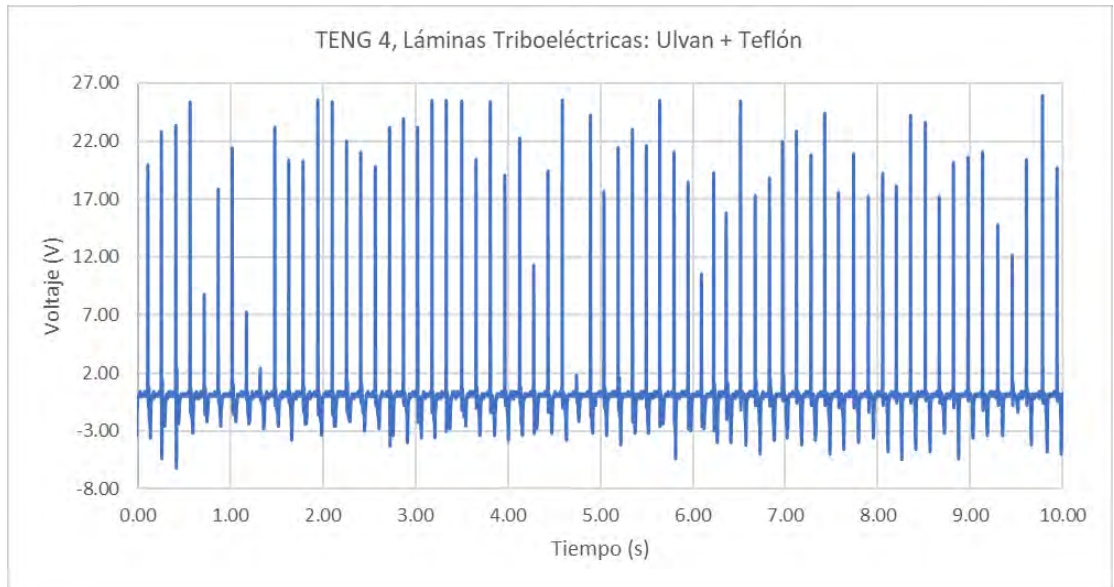


Figura 77: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 4

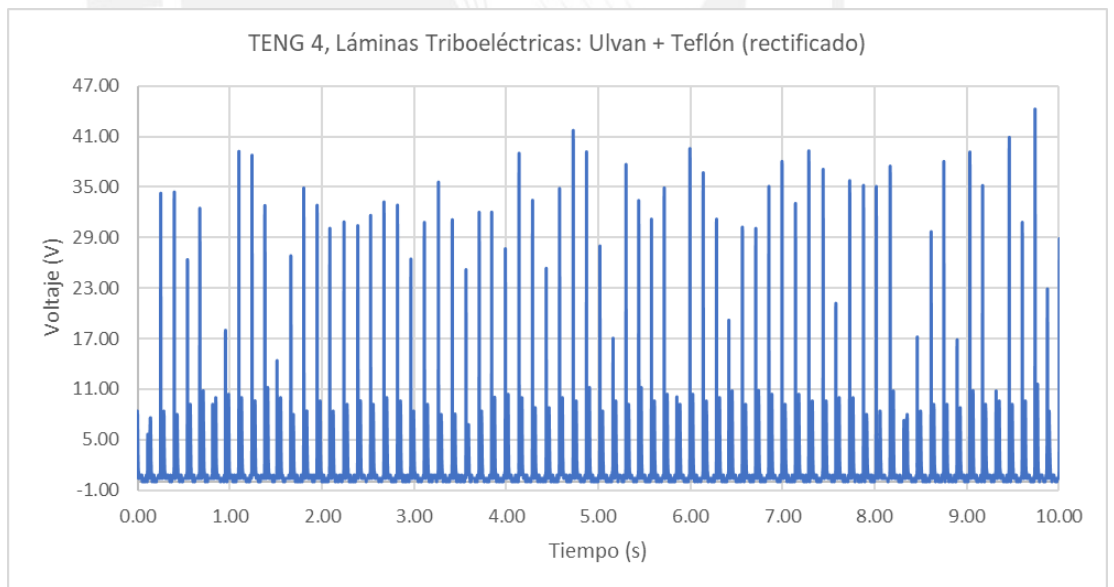


Figura 78: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 4 rectificado

- **Prototipos con Kapton®:**

- TENG 5

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, y la carga se superpone en algunos picos, generando una carga mayor, aunque también se generan picos de separación cerca a los picos de contacto. Se observa que en comparación con la Figura 71-72 llegan a unos picos similares, pero el par de carragenina + kapton se muestra con picos más estables.

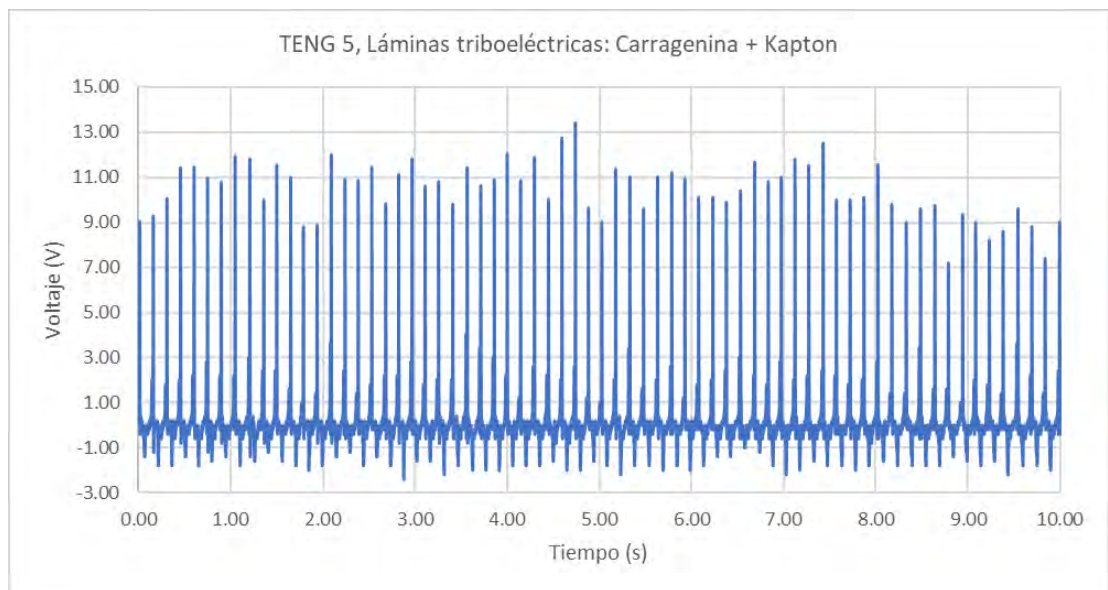


Figura 79: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 5

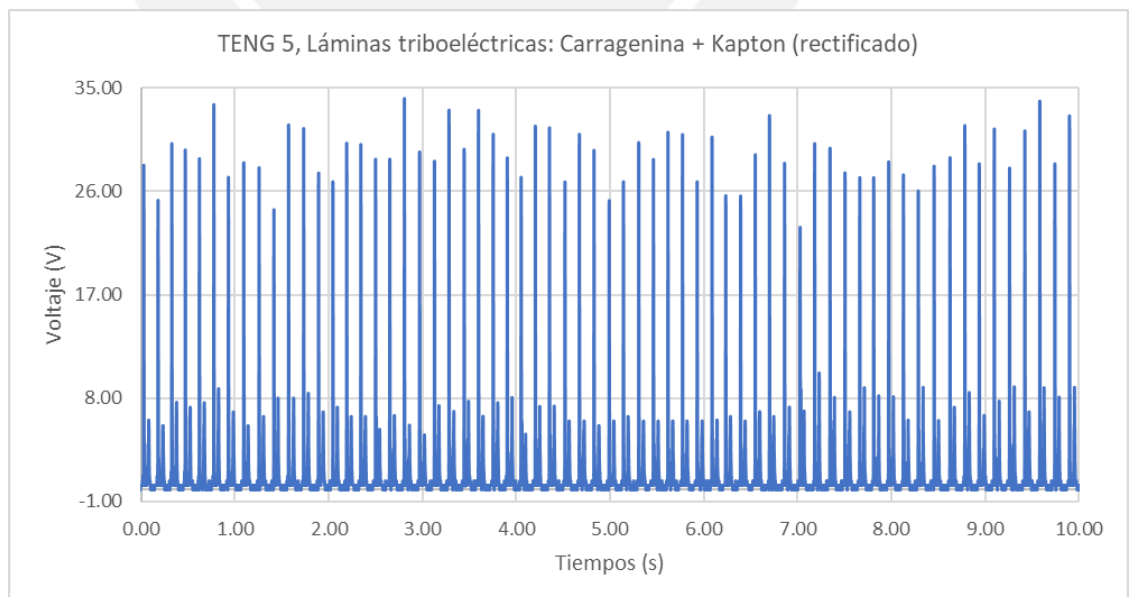


Figura 80: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 5 rectificado

o TENG 6

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, y la carga se superpone en algunos picos, generando una carga mayor, aunque también se generan picos de separación cerca a los picos de contacto. Se observa que en comparación con la Figura 73-74 llegan a unos picos mayores, pero el par de carragenina + teflón se muestra con picos más estables.

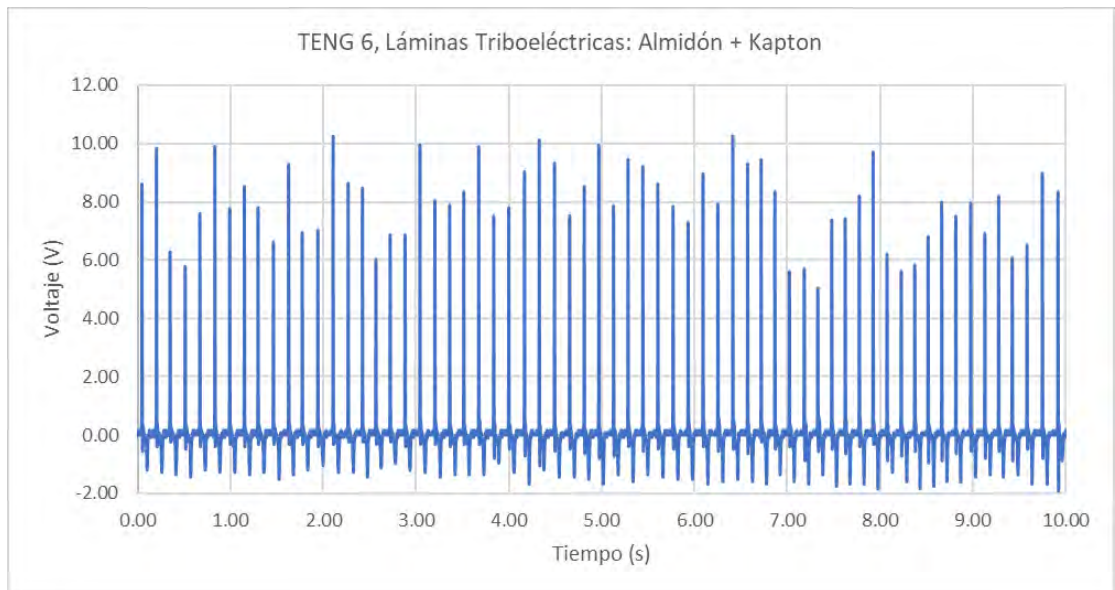


Figura 81: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 6

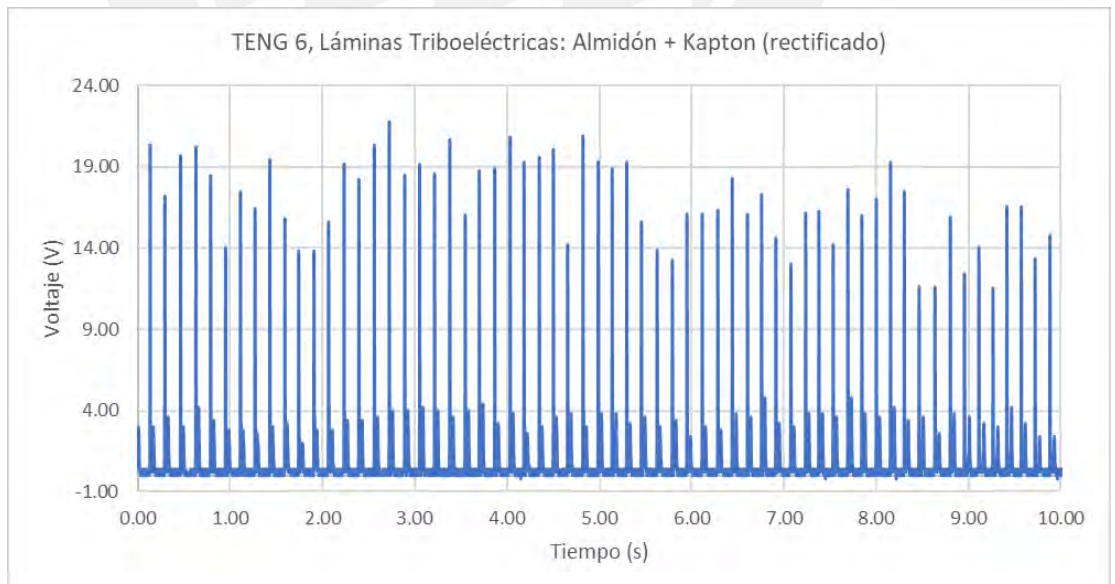


Figura 82: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 6 rectificado

o TENG 7

Se observa que, al usar un rectificador, los valores negativos son convertidos a positivos, en este caso la carga no llega a superponerse, pero se generan picos de separación cerca a los picos de contacto. Se puede observar en comparación a las figuras 75-76 que este par genera mayor carga.

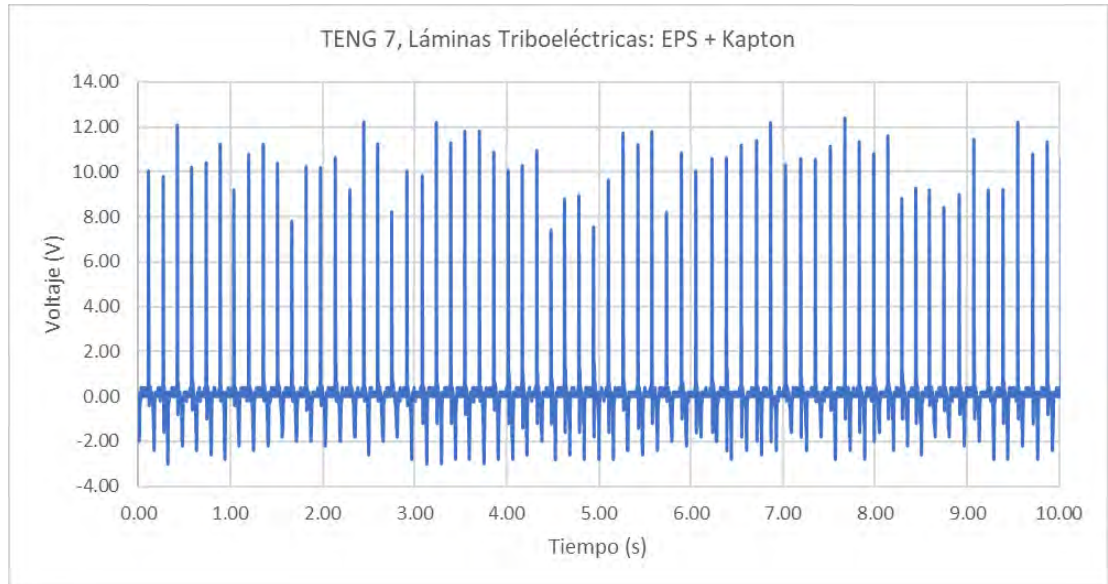


Figura 83: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 7

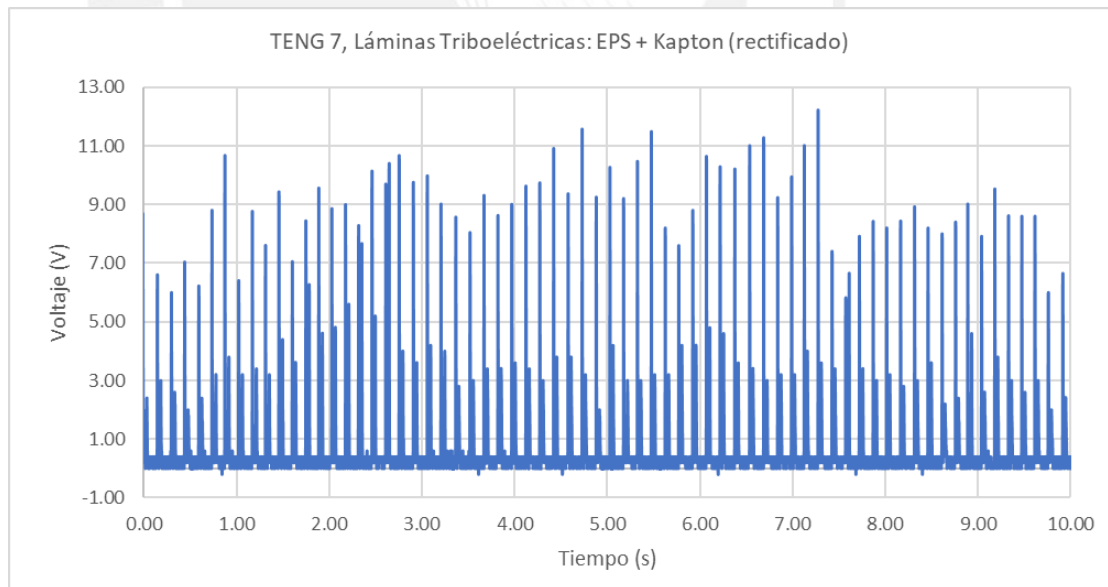


Figura 84: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 7 rectificado

o TENG 8

En este caso tenemos una onda con picos pequeños los cuales se concentran cuando es rectificado produciendo algunos picos mayores, esto debido a que el ulvan y el kapton poseen una tendencia similar a ganar o perder electrones y cuando sucede este efecto, las mediciones de picos son pequeñas y al azar tal como se observa en la sección 3.4.1.

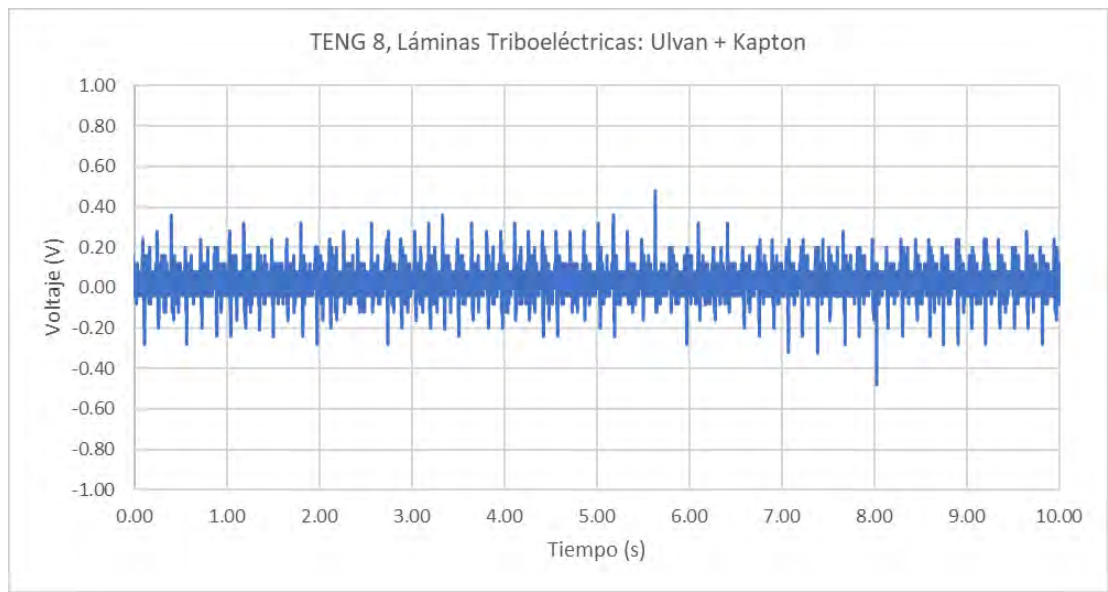


Figura 85: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 8

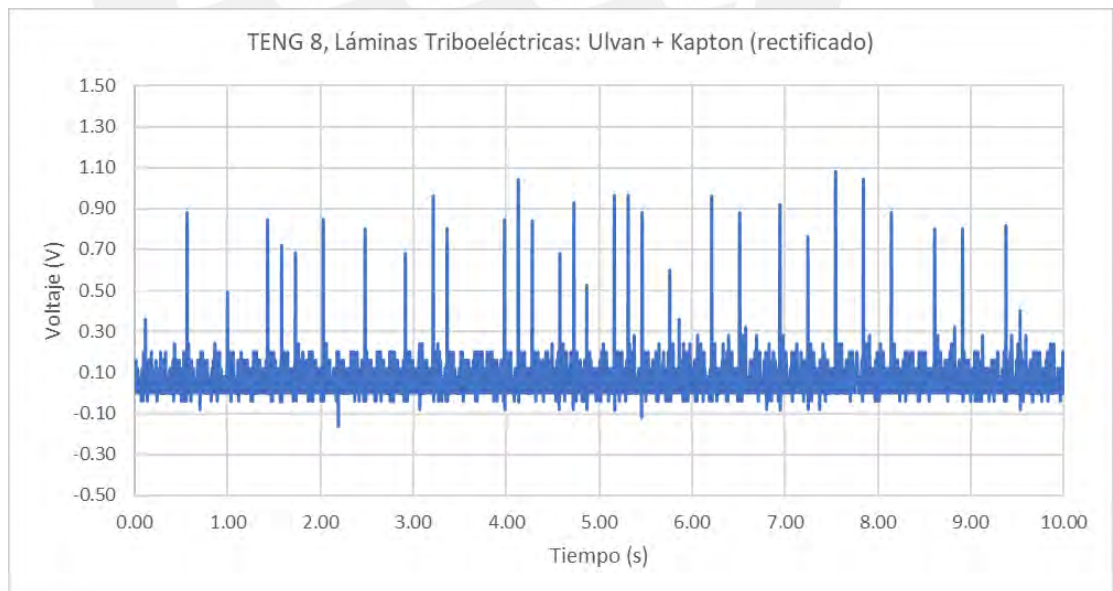


Figura 86: Imagen representativa del Voltaje en el tiempo (10 s) en TENG 8 rectificado

En la tabla podemos observar un resumen de los valores obtenidos en la medición de voltaje en un tiempo determinado, podemos observar las gráficas de estas mediciones en las Figuras 71-86.

Tabla 8: Resumen de resultados de medición de voltaje en el tiempo

Prototipo	Biopolímero de lámina	Voltaje máximo (V)	Voltaje mínimo (V)	Voltaje máximo rectificado (V)	Voltaje mínimo rectificado (V)
Prototipos con lámina de Teflón®					
TENG 1	Carragenina	11.20	-2.56	66.40	-0.80
TENG 2	Almidón	6.88	-1.92	16.00	-0.40
TENG 3	EPS	6.48	-2.32	6.96	-0.40
TENG 4	Ulvan	26.50	-6.80	43.60	-0.40
Prototipos con lámina de Kapton®					
TENG 5	Carragenina	14.80	-4.60	38.40	-0.40
TENG 6	Almidón	6.00	-1.52	16.40	-0.40
TENG 7	EPS	15.20	-3.60	26.20	-0.60
TENG 8	Ulvan	2.12	-1.88	1.92	-0.40

de estos resultados podemos observar que las mediciones con el circuito rectificado obtienen un mayor voltaje máximo, esto se debe a que se aprecia un efecto de superposición del voltaje convertido. También observamos que en efecto el voltaje mínimo se acerca a 0 en el circuito rectificado, teniendo valor aproximado de -0.40 V debido al ruido que se obtiene en el osciloscopio.

Podemos observar también que el TENG 8 el cual tiene como láminas triboeléctricas el kapton y ulvan cuenta con el menor rendimiento de todas, mientras que por el contrario el TENG 1 el cual tiene como láminas triboeléctricas el teflón y carragenina, tienen el mejor desempeño en esta prueba.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Los ensayos de tracción nos dan como resultado en la carragenina una deformación de hasta 38.33% con un esfuerzo máximo de hasta 26.51 MPa, en el almidón una deformación de hasta 15.42% con un esfuerzo máximo de hasta 2.04 MPa, en el EPS una deformación de hasta 16.11% con un esfuerzo máximo de hasta 6.40 MPa y finalmente el ulvan con una deformación de hasta 25.67 % con un esfuerzo máximo de hasta 1.85 MPa.

El prototipo TENG se optimizó evaluando principalmente el recubrimiento exterior, en los cuales utilizamos 4 materiales, cartulina corrugada, cartulina plastificada, Corrospum y una mezcla de Corrospum y cinta aislante, de los cuales se obtuvo como material a utilizar el Corrospum ya que obtuvo los mejores resultados y tenía la mejor flexibilidad y capacidad de recuperación

A partir de la optimización se fabricaron 8 prototipos con distintos pares triboeléctricos 4 pares de biopolímero (almidón, ulvan, carragenina y EPS) con kapton y 4 pares de biopolímero (almidón, ulvan, carragenina y EPS) con teflón los cuales mostraron valores máximos de 66.40 V en el par triboeléctrico de teflón + carragenina, debido a la tendencia del teflón de cargarse negativamente, mientras que el valor mínimo de 2.12 V del par triboeléctrico de kapton + ulvan, esto debido a que el kapton como el ulvan muestran comportamientos similares en cuanto al comportamiento del material de ganar o perder electrones por lo que se encontraron valores muy pequeños y aleatorios. Podemos notar también, que el EPS como material no logra acumular carga cuando se usa el rectificador, al contrario del almidón, carragenina y ulvan, esto podría ser debido a la composición química de este material.

Con estos resultados podemos observar que los distintos TENG generan suficiente voltaje, como para ser incluidos como generador de energía para distintas aplicaciones tales como, dispositivos electrónicos portátiles de bajo consumo (LEDs, Relojes, Sensores).

Se recomienda continuar con las investigaciones en el presente trabajo para aplicaciones en la generación y recolección de energía a partir del movimiento con el cual se podría encontrar un reemplazo ecoamigable para la generación de energía para dispositivos portátiles.

CAPÍTULO 5. Referencias bibliográficas

- Fan, Feng Ru, Lin, Long, Zhu, Guang, Wu, Wenzhuo, Zhang, Rui, & Wang, Zhong Lin. (2012). Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films. *Nano Letters*, 12(6), 3109–3114. <https://doi.org/10.1021/nl300988z>
- Gonzales, Karen N., Troncoso, Omar P., Torres, Fernando G., & López, Daniel. (2020). Molecular α -relaxation process of exopolysaccharides extracted from *Nostoc commune* cyanobacteria. *International Journal of Biological Macromolecules*, 161, 1516–1525. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.268>
- Kidgell, Joel T., Magnusson, Marie, de Nys, Rocky, & Glasson, Christopher R. K. (2019a). Ulvan: A systematic review of extraction, composition and function. En *Algal Research* (Vol. 39). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101422>
- Kidgell, Joel T., Magnusson, Marie, de Nys, Rocky, & Glasson, Christopher R. K. (2019b). Ulvan: A systematic review of extraction, composition and function. En *Algal Research* (Vol. 39). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101422>
- La historia de la electricidad.* (s/f). www.epec.com.ar
- Lacks, Daniel J., & Mohan Sankaran, R. (2011). Contact electrification of insulating materials. En *Journal of Physics D: Applied Physics* (Vol. 44, Número 45). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/45/453001>
- Lowell, J., & Rose-Innes, A. C. (1980). Contact electrification. *Advances in Physics*, 29(6), 947–1023. <https://doi.org/10.1080/00018738000101466>
- Ma, Mingyuan, Kang, Zhuo, Liao, Qingliang, Zhang, Qian, Gao, Fangfang, Zhao, Xuan, Zhang, Zheng, & Zhang, Yue. (2018). Development, applications, and future directions of triboelectric nanogenerators. En *Nano Research* (Vol. 11, Número 6, pp. 2951–2969). Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s12274-018-1997-9>
- Moeini, Arash, Germann, Natalie, Malinconico, Mario, & Santagata, Gabriella. (2021). Formulation of secondary compounds as additives of biopolymer-based food packaging: A review. En *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 114, pp. 342–354). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.040>

- Mohammed, Munawar A., Syeda, Jaweria T. M., Wasan, Kishor M., & Wasan, Ellen K. (2017). An overview of chitosan nanoparticles and its application in non-parenteral drug delivery. En *Pharmaceutics* (Vol. 9, Número 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics9040053>
- Pan, Shuaihang, & Zhang, Zhinan. (2019). Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. En *Friction* (Vol. 7, Número 1, pp. 2–17). Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>
- Ponnamma, D., Sadasivuni, K. K., & AlMaadeed, M. A. (2017). Introduction of Biopolymer Composites: What to do in Electronics? En *Biopolymer Composites in Electronics* (pp. 1–12). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809261-3.00001-2>
- Rodriguez, Sol, Gonzales, Karen N., Romero, Eduardo G., Troncoso, Omar P., & Torres, Fernando G. (2017a). Unusual reversible elastomeric gels from Nostoc commune. *International Journal of Biological Macromolecules*, 97, 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.048>
- Rodriguez, Sol, Gonzales, Karen N., Romero, Eduardo G., Troncoso, Omar P., & Torres, Fernando G. (2017b). Unusual reversible elastomeric gels from Nostoc commune. *International Journal of Biological Macromolecules*, 97, 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.048>
- Rodriguez, Sol, Torres, Fernando G., Arroyo, Junior, Gonzales, Karen N., Troncoso, Omar P., & López, Daniel. (2020). Synthesis of highly stable κ/ι -hybrid carrageenan micro- and nanogels via a sonication-assisted microemulsion route. *Polymers from Renewable Resources*, 11(3–4), 69–82. <https://doi.org/10.1177/2041247920960973>
- Sanchis, M. J., Carsí, M., Culebras, M., Gómez, C. M., Rodriguez, S., & Torres, F. G. (2017). Molecular dynamics of carrageenan composites reinforced with Cloisite Na⁺ montmorillonite nanoclay. *Carbohydrate Polymers*, 176, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.012>
- Singh, Rahul, Polu, Anji Reddy, Bhattacharya, B., Rhee, Hee Woo, Varlikli, Canan, & Singh, Pramod K. (2016). Perspectives for solid biopolymer electrolytes in dye sensitized solar cell and battery application. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 65, pp. 1098–1117). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.026>

- Stenner, Richard, Matubayasi, Nobuyuki, & Shimizu, Seishi. (2016). Gelation of carrageenan: Effects of sugars and polyols. *Food Hydrocolloids*, 54, 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.10.007>
- Torres, F. G., Troncoso, O. P., Torres, C., Díaz, D. A., & Amaya, E. (2011). Biodegradability and mechanical properties of starch films from Andean crops. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(4), 603–606. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.01.026>
- Torres, Fernando G., Arroyo, Junior, Alvarez, Ricardo, Rodriguez, Sol, Troncoso, Omar, & López, Daniel. (2019a). Carboxymethyl κ/ι -hybrid carrageenan doped with NH₄I as a template for solid bio-electrolytes development. *Materials Chemistry and Physics*, 223, 659–665. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.11.051>
- Torres, Fernando G., Arroyo, Junior, Alvarez, Ricardo, Rodriguez, Sol, Troncoso, Omar, & López, Daniel. (2019b). Molecular dynamics of carboxymethyl κ/ι -hybrid carrageenan films doped with NH₄I. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 58(8), 889–902. <https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1542713>
- Torres, Fernando G., Troncoso, Omar P., Díaz, Diego A., & Amaya, Evelin. (2011). Morphological and thermal characterization of native starches from Andean crops. *Starch/Staerke*, 63(6), 381–389. <https://doi.org/10.1002/star.201000155>
- Troncoso, Omar P., & Torres, Fernando G. (2020). Non-conventional starch nanoparticles for drug delivery applications. *MEDICAL DEVICES & SENSORS*, 3(6). <https://doi.org/10.1002/mds3.10111>
- Tziveleka, Leto Aikaterini, Ioannou, Efstathia, & Roussis, Vassilios. (2019a). Ulvan, a bioactive marine sulphated polysaccharide as a key constituent of hybrid biomaterials: A review. En *Carbohydrate Polymers* (Vol. 218, pp. 355–370). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.074>
- Tziveleka, Leto Aikaterini, Ioannou, Efstathia, & Roussis, Vassilios. (2019b). Ulvan, a bioactive marine sulphated polysaccharide as a key constituent of hybrid biomaterials: A review. En *Carbohydrate Polymers* (Vol. 218, pp. 355–370). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.074>

- Wang, Zhong Lin. (2020). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. *Nano Energy*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104272>
- Weiner, R., Langille, S., & Quintero, E. (1995). Structure, function and immunochemistry of bacterial exopolysaccharides. En *Journal of Industrial Microbiology* (Vol. 15).
- Xu, Cheng, Zi, Yunlong, Wang, Aurelia Chi, Zou, Haiyang, Dai, Yejing, He, Xu, Wang, Peihong, Wang, Yi Cheng, Feng, Peizhong, Li, Dawei, & Wang, Zhong Lin. (2018). On the Electron-Transfer Mechanism in the Contact-Electrification Effect. *Advanced Materials*, 30(15). <https://doi.org/10.1002/adma.201706790>
- Yang, Ya, Zhou, Yu Sheng, Zhang, Hulin, Liu, Ying, Lee, Sangmin, & Wang, Zhong Lin. (2013). A single-electrode based triboelectric nanogenerator as self-powered tracking system. *Advanced Materials*, 25(45), 6594–6601. <https://doi.org/10.1002/adma.201302453>
- Yapo, B. M., Robert, C., Etienne, I., Wathelet, B., & Paquot, M. (2007). Effect of extraction conditions on the yield, purity and surface properties of sugar beet pulp pectin extracts. *Food Chemistry*, 100(4), 1356–1364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.012>
- Zhang, Renyun, & Olin, Håkan. (2020). Material choices for triboelectric nanogenerators: A critical review. En *EcoMat* (Vol. 2, Número 4). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/eom2.12062>