

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias con Línea terminal en  
Nanotecnología

Desarrollo de un nanogenerador  
híbrido de generación eléctrica a  
partir de un sistema triboeléctrico y  
microfluídico.

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias en Nanotecnología

Presenta  
Sofía Nava Coronel

Dirigido por:  
Dr. Luis Gerardo Arriaga Hurtado

Co-dirigido por:  
Dr. Ricardo Antonio Escalona Villalpando

Dr. Luis Gerardo Arriaga Hurtado  
Presidente

Dr. Ricardo Antonio Escalona  
Villalpando

Secretario

Dr. José Luis Herrera Celis

Vocal

Dra. Janet Ledesma García

Suplente

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

Suplente



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Desarrollo de un nanogenerador híbrido de  
generación eléctrica a partir de un sistema  
triboeléctrico y microfluídico

**por**

Sofía Nava Coronel

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](#).

**Clave RI:** IGMAC-300413



## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres, a mi esposa, familiares y amigos que siempre han confiado en mí y me han apoyado en todo.

## Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mis asesores de tesis (Dr. José Luis, Dr. Gerardo, Dr. Ricardo, Dra. Janet, Dr. Juvenal) que me han apoyado en todo momento, y que gracias a ellos se ha llevado a cabo este proyecto. Agradezco a Dani, que me ha ayudado y motivado para terminar esta etapa de mi vida. También agradezco todo el apoyo de mi mamá, que ha luchado junto conmigo para seguir adelante.

Un agradecimiento muy especial para las personas que han formado parte de mi vida durante este proceso, a mis compañeras y compañeros en CIDETEQ (Ale, Abi, Diana, Arely), a los chicos que forman parte de LAMByN. A mis mejores amigas (Cris, Dulce, Ale) que llevamos años acompañándonos en los momentos más importantes de nuestras vidas, y sobre todo por sus consejos. A mi compañero y amigo Jassihel quién ha sido de gran ayuda en todo momento, un enorme apoyo para sobrevivir en esta etapa.

Agradezco a P&G por sus promociones y a la cadena de Walmart, que nos han dado la oportunidad de obtener productos gratuitamente en época de austeridad.

Gracias al LAByN que he me ha hecho sentir en casa tanto en la UAQ como en CIDETEQ, y a CONACYT que me ha otorgado parte de la beca que me ayudó a continuar con los estudios de posgrado.



## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	3
LISTA DE TABLAS .....	6
HIPÓTESIS .....	13
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
JUSTIFICACIÓN.....	14
CAPÍTULO 1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	15
1.1.- ELECTRIFICACIÓN POR CONTACTO.....	15
1.2.- MECANISMOS FÍSICOS DE LA ELECTRIFICACIÓN POR CONTACTO.....	15
1.3.- GENERADORES TRIBOELÉCTRICOS .....	22
1.4.- MICROFLUÍDICA Y FLUIDOS .....	25
1.5.- LITOGRAFÍA.....	27
1.5.1.- TÉCNICAS DE LITOGRAFÍA SUAVE .....	28
1.6.- NANOGENERADORES TRIBOELÉCTRICOS.....	30
CAPÍTULO 2.- DISEÑO Y SIMULACIONES.....	31
2.1.- SELECCIÓN DE MÓDULO Y ESTUDIO.....	32
2.2.- DISEÑO DE LA GEOMETRÍA .....	33
2.3.- SELECCIÓN DE MATERIALES .....	34
2.4.- PARÁMETROS DEL ESTUDIO .....	35
2.5.- MALLADO.....	36
2.6.- PARÁMETROS DE BARRIDO.....	37
2.7.- POSPROCESAMIENTO.....	37
2.8.- RESULTADOS.....	38
2.9.- CONCLUSIONES .....	41
CAPÍTULO 3.- FABRICACIÓN.....	42
3.1.- PREPARACIÓN DE PDMS.....	43
3.2.- DISEÑO Y FORMACIÓN DE LOS CANALES .....	44
3.3.- OBTENCIÓN DE PELÍCULA DE PDMS.....	46



3.4.- UNIÓN POR PLASMA.....	48
3.5.- PREPARACIÓN DE SUDOR SIMULADO .....	50
3.6.- PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	51
3.7.- MEDICIONES CON EL OSCILOSCOPIO .....	52
3.8.- CONCLUSIONES .....	53
CAPÍTULO 4.- RESULTADOS .....	55
4.1.- FABRICACIÓN DE MOLDES DE MICROCANALES RANURADOS .....	55
4.2.- MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA PELÍCULA DE PDMS .....	57
4.3.- FUNCIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS .....	58
4.4.- ANÁLISIS DE PRUEBAS EN OSCILOSCOPIO .....	59
4.4.1.- <i>OBTENCION Y FILTRADO DE SUDOR HUMANO</i> .....	60
4.4.2.- <i>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON EL OSCILOSCOPIO</i> .....	61
CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES.....	76
REFERENCIAS .....	77



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Gráfico representativo del modo de trabajo de contacto vertical. Tomado de [13] .....	23
Figura 2.- Gráfico representativo del modo de trabajo de deslizamiento lateral. Tomado de [13] .....	23
Figura 3.- Gráfico representativo del modo de trabajo de un solo electrodo. Tomado de [13] .....	24
Figura 4.- Gráfico representativo del modo de trabajo de modo independiente. Tomado de [13] .....	25
Figura 5.- Gráfico descriptivo del proceso de litografía. Tomado de [15].	28
Figura 6.- Características de los nanogeneradores microfluídicos.	30
Figura 7.- Esquema del proceso de simulación del nanogenerador triboeléctrico.	31
Figura 8.- Diagrama de las geometrías que constituyen el dispositivo nanogenerador triboeléctrico.	33
Figura 9.- Resultado del procedimiento de mallado del modelo 2D. a) Vista general y b) acercamiento.	36
Figura 10.- Diagrama de la distribución de potencial obtenidas del barrido a 0 mm recorridos por el líquido.	38
Figura 11.- Diagrama de la distribución de potencial obtenidas del barrido a 10 mm recorridos por el líquido.	39
Figura 12.- Diagrama de la distribución de potencial obtenidas del barrido después de 20 mm recorridos por el líquido.	39
Figura 13.- Gráfico de la diferencial de potencial obtenido con respecto de la distancia recorrida por la solución.	40
Figura 14.- Gráfico de la densidad de carga superficial resultante de la electrificación por contacto entre el PDMS y el agua.	41
Figura 15.- Diagrama de los componentes del dispositivo nanogenerador.	42
Figura 16.- Diagrama general de los procesos de fabricación del dispositivo.	42
Figura 17.- Fotografía de los reactivos utilizados para la preparación del PDMS.	43
Figura 18.- Fotografía de la cámara de vacío utilizada para la desgasificación del PDMS.	43
Figura 19.- Fotografía del equipo de impresión 3D (ANYCUBIC, PHOTON MONO X 6K). .....	44



Figura 20.- Fotografía del equipo de lavado de moldes (ANYCUBIC, Wash and Cure 2.0).  
 ..... 45

Figura 21.- Fotografía del equipo de curado con luz UV (ANYCUBIC, Wash and Cure 2.0).  
 ..... 46

Figura 22.- Fotografía del equipo de spin coating (SPECIALITY COATING SYSTEMS, 6800 Spin Coater Series). ..... 47

Figura 23.- Fotografía del plato de calentamiento para tratamiento térmico del PDMS depositado sobre el vidrio. .... 47

Figura 24.- Diagrama representativo del proceso de adherencia de PDMS- PDMS mediante plasma.1) Piezas de PDMS que se introducen boca arriba en el equipo, 2) incidencia del plasma sobre las superficies a unir,3) unión de PDMS-PDMS a través de enlaces covalentes siloxanos, 3) dispositivo completamente unido. .... 48

Figura 25.- Fotografía del equipo de limpieza por plasma donde se realiza la adherencia de la película con la tapa con canal microfluídico de PDMS (MTI CORPORATION, Medium Plasma Cleaner). ..... 49

Figura 26.- Fotografía de la perforación de entrada y salida de fluido en el canal de PDMS.  
 ..... 49

Figura 27.- Ilustración del flujo del proceso de preparación de la solución de sudor simulado.  
 ..... 50

Figura 28.- Fotografía del potenciómetro HACH, SENSION TM utilizado para el ajuste de pH de las soluciones de sudor simulado. .... 51

Figura 29.- Fotografía de la prueba de funcionamiento del prototipo TENG con colorante azul. .... 52

Figura 30.- Diagrama general del proceso de medición de la diferencia de potencial obtenida del prototipo TENG. .... 52

Figura 31.- Fotografías de a) la conexión del osciloscopio y b) la inyección de fluidos al microcanal del prototipo TENG. .... 53

Figura 32.- Fotografía del molde obtenido mediante impresión 3D después de los tratamientos de curado. .... 55

Figura 33.- Fotografía del canal microfluídico que no ha polimerizado completamente. .... 56

Figura 34.- Fotografía del canal microfluídico de PDMS obtenido del molde que ha recibido un tratamiento térmico. .... 57

Figura 35.- Gráfico obtenido de la medición en perfilometría de la película de PDMS de 100  $\mu\text{m}$  depositada sobre vidrio. .... 58

Figura 36.- Fotografía de prototipos sometidos a prueba de funcionamiento para comprobar fugas en el microcanal. .... 59



Figura 37.- Fotografía de la bomba peristáltica (COLE PALMER, MASTERFLEX® L/S ECONOMY DRIVE) utilizada para la inyección de las soluciones en el sistema microfluídico. .... 60

Figura 38.- Diagrama ilustrativo del tipo de flujo laminar (imagen superior) y flujo de estado de transición (imagen inferior). .... 62

Figura 39.- Gráficos de la diferencia de potencial con respecto a la velocidad de flujo para cada tipo de solución. a) Diferencia de potencial negativo y b) diferencia de potencial positivo. .... 64

Figura 40.- Diagrama ilustrativo del proceso de adsorción de iones H<sup>+</sup> en la interfase PDMS/fluido..... 65

Figura 41.- Diagrama ilustrativo de la generación de un voltaje en circuito abierto. .... 65

Figura 42.- Diagrama ilustrativo de la diferencia de potencial en el nanogenerador bajo carga, propuesto para los picos negativos. .... 66

Figura 43.- Diagrama ilustrativo del proceso de desorción de iones H<sup>+</sup> de la interfase. .... 66

Figura 44.- Diagrama ilustrativo de la diferencia de potencial en el nanogenerador bajo carga, propuesto para los picos positivos..... 67

Figura 45.- Gráficos de la diferencia de potencial generada contra la resistencia de carga para diferentes soluciones: a) para una diferencia de potencial negativo y b) para una diferencia de potencial positivo..... 68

Figura 46.- Gráficos de la corriente en función de la diferencia de potencial obtenida para carga (a) negativa y b) positiva en las mediciones del osciloscopio. .... 70

Figura 47.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de agua DI en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva. .... 72

Figura 48.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de solución de sudor simulado con una concentración 0 mM de ácido láctico en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva. .... 73

Figura 49.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de solución de sudor simulado con una concentración 70 mM de ácido láctico en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva. .... 74

Figura 50.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de sudor humano en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva. .... 75





## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.- Tabla de los materiales utilizados para la simulación y el valor de su respectiva permitividad relativa.....	34
Tabla 2.- Valores de potencia máxima generada con las diferentes soluciones de prueba, las columnas dos columnas de la izquierda corresponden a valores obtenidos con la desorción de iones H+, las columnas de la derecha corresponden a los valores en el proceso de adsorción de los iones. ....	71



## RESUMEN

En este trabajo de investigación se describe el proceso que se llevó a cabo para la fabricación de un dispositivo nanogenerador de energía eléctrica a partir del flujo de una solución a través de un microcanal PDMS sobre un sustrato de vidrio, las mediciones de la diferencia de potencial entre los electrodos de cobre se realizaron en un osciloscopio y demostraron que el dispositivo es capaz de generar una potencia con respecto a las propiedades químicas de una solución. Su principio de funcionamiento se basa en la transferencia de cargas por un efecto triboeléctrico

La caracterización del dispositivo consistió en pruebas de inyección de soluciones de agua, sudor simulado y sudor humano. Las pruebas con una solución de agua desionizada dieron como resultado una potencia máxima de 3.209 nW; con una solución de sudor simulado sin ácido láctico se alcanzó los 2.33 nW, mientras que ácido láctico a una concentración de 70 mM se tuvo una potencia de 2.033 nW; finalmente, las pruebas con sudor de origen humano reportaron una potencia máxima de 0.99 nW.

**Palabras clave: nanogenerador, triboelectricidad, microfluídico, híbrido, sudor**

## ABSTRACT

This research work describes the process that was carried out for the fabrication of a nanogenerator device of electrical energy from the flow of a solution through a PDMS microchannel on a glass substrate, the measurements of the potential difference between the copper electrodes were performed in an oscilloscope and showed that the device can generate a power with respect to the chemical properties of a solution. Whose principle of operation is based on charge transfer by a triboelectric effect.

The tests with a deionized water solution obtained a maximum power of 3.209 nW, with a simulated sweat solution with a concentration of 0 mM of lactic acid 2.33 nW were obtained, with a lactic acid concentration of 70 mM a power of 2.033 nW was obtained, while the sweat of human origin resulted in 0.99 nW.

**Keywords: nanogenerator, triboelectricity, microfluidic, hybrid, sweat**



## INTRODUCCIÓN

La electrificación por contacto es un fenómeno eléctrico que se ha estudiado a lo largo de la historia a partir de los pensamientos de los filósofos griegos, quienes buscaban explicar la razón por la cual la seda quedaba cargada al frotarse contra el ámbar. Con el paso de los años y con la búsqueda de la explicación, estos filósofos se dieron cuenta que casi todos los materiales pueden ser capaces de almacenar una carga después de entrar en contacto con otros. En los últimos años estos estudios han cobrado importancia gracias a los proyectos denominados “*Energy Harvestig*” que promueve el aprovechamiento de energías residuales como el movimiento mecánico de fluidos, corporales, entre otros.

Este creciente interés por aprovechar las energías residuales se ha intensificado ante el desarrollo de dispositivos a baja escala, los cuales requieren de fuentes de energía portables capaces de suministrarles la energía requerida para su funcionamiento, propiciando el desarrollo de sistemas autosustentables a escalas micro y nanométricas. Las baterías han dejado de ser una opción debido al tamaño y a los materiales con los que se fabrican, los cuales contaminan el medio ambiente y resultan nocivos para la salud humana. Desde 2012 surgieron los dispositivos nanogeneradores triboeléctricos (*TENG* por sus siglas en inglés) capaces de generar una diferencia de potencial a partir de la fricción entre dos materiales de diferente carga, según las series de materiales triboeléctricos. La potencia que son capaces de entregar dichos dispositivos es de apenas unos nanowatts; sin embargo, sus tamaños alcanzan el orden de los micrómetros, convirtiéndolos en la base de los requeridos sistemas autosustentables.

Para este trabajo de investigación el enfoque del dispositivo es la generación de una señal de voltaje o diferencia de potencial a partir del flujo de una solución en el microcanal, dando lugar a un proceso fisicoquímico de transferencia de carga, de tal manera que se fabrica un prototipo capaz de funcionar como un generador de energía eléctrica y como un sensor. Todo depende de las propiedades químicas de la solución que sea inyectada en el microcanal. Al ser un sistema híbrido, las aplicaciones de dicho dispositivo cubren las áreas de la electrónica, la farmacéutica, la alimenticia, y la medicina, entre otras. Además de las propiedades de la



solución, también se puede aprovechar la energía cinética del fluido a través del dispositivo microfluídico puesto que al entrar en fricción con las paredes del microcanal se transfieren cargas eléctricas entre el fluido y el material del microcanal.

En las siguientes páginas se concentran capítulos que dan la información necesaria sobre el proyecto de investigación realizado. En el capítulo 1 se describe el fundamento teórico del efecto triboeléctrico que apoya la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos que dan lugar a la transferencia de cargas entre un material sólido y uno líquido. En el capítulo 2 se describe la simulación de los procesos electrostáticos empleando el *software* COMSOL Multiphysics® (COMSOL); dicha simulación permite comprender el funcionamiento del nanogenerador, formular las estructuras que se integrarán en el sistema real, así como aplicar las ecuaciones necesarias para tener una estimación de los resultados. También se detalla en el capítulo 3 la metodología que se llevó a cabo para la fabricación del dispositivo *TENG*. En los capítulos 4 y 5 se aborda el análisis de los resultados y se presentan las conclusiones del presente proyecto.



## ANTECEDENTES

En 2013, Zong-Hong Lin *et al.* [1] estudiaron el fenómeno de la electrificación por contacto entre el agua y un sólido a partir de un diseño de estructuras piramidales de 10  $\mu\text{m}$  sobre una película de PDMS de 140  $\mu\text{m}$  puesta en contacto con agua desionizada (DI) y una solución de NaCl altamente concentrada, con el objetivo de evaluar el dispositivo como un nanogenerador. El dispositivo alcanzó una densidad de corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ ) de 2.45  $\text{mA}\cdot\text{m}^{-2}$  y una densidad de potencia de 0.13  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , demostraron que el dispositivo puede generar energía eléctrica a partir del contacto entre el PDMS y soluciones líquidas como el agua de mar.

La fibrosis quística es una enfermedad genética letal que se puede diagnosticar mediante la medición de la corriente del sudor del paciente con sospecha. En el año 2014, Veras Mattar *et al.* [2] llevaron a cabo la medición de la conductividad del sudor de 728 pacientes con sospecha de fibrosis quística. Con ayuda de un equipo comercial denominado Macroduct<sup>®</sup>, se concluyó que el cloruro de sodio es el componente principal del sudor. Los resultados indican que un valor de corriente de  $\geq 90$   $\text{mmol/L}$  apoya un diagnóstico de fibrosis quística, mientras que los valores de 50 a 79  $\text{mmol/L}$  requieren de más estudios, siendo un valor normal de conductividad  $\leq 50$ . Con lo anterior, se demuestra que el análisis de la conductividad es una manera eficaz y fácil de diagnóstico de esta enfermedad.

En este sentido, los dispositivos *TENG* han propiciado la detección de sustancias y/o moléculas tales como el sodio, el lactato, y la medición de propiedades como la conductividad del alcohol. En 2019, Bruck *et al.* [3] desarrollaron un dispositivo *TENG* en el que se utilizan agua desionizada (DI) y solución salina. El dispositivo es un prototipo de brazo capaz de generar flujos de  $\approx 1$   $\mu\text{L}/\text{min}$ , el cual se encuentra dentro del rango de velocidades de sudoración normal en una persona. Este sistema permite realizar pruebas de otros dispositivos de monitoreo para analizar su funcionamiento.

El fenómeno de la electrificación por contacto resulta ser un problema en algunas industrias, como la petroquímica, la farmacéutica, la química o en la fabricación de semiconductores, mientras que para otras aplicaciones es el fundamento para su funcionamiento, tal es el caso



de la electrofotografía, la separación electrostática, la microfluídica o el recubrimiento electrostático. El fenómeno de la electrificación por contacto es un fenómeno complejo debido a los factores de los que depende la transferencia de carga. Uno de los aspectos importantes es la relación de propiedades entre los materiales en contacto. En 2019, Zhang Xuan *et al.* [4] estudiaron la comprensión del orden de algunos polímeros, las series triboeléctricas al ser uno de los tipos de materiales más utilizados en diversas aplicaciones. Ellos propusieron que la polaridad del polímero después del contacto es lo que determina el orden en la lista de las series; dicha polaridad está directamente relacionada con la basicidad de Lewis y, además, establece la habilidad del polímero para interactuar con una molécula o un ion.

En 2020, Sun Jianguo *et al.* [5] reportaron un nanogenerador piezoeléctrico de bajo costo, biocompatible y altamente compresible basado en una esponja de madera obtenida a partir de un proceso de deslignificación. La madera natural genera un voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) de 0.0081 V, mientras que la estructura de la esponja le permite aumentar su efecto triboeléctrico obteniendo un  $V_{OC}$  de 0.69 V. Tal es su eficiencia que, al conectar en serie 60 diodos emisores de luz es capaz de encenderlos completamente. Además, demostraron la biodegradabilidad del dispositivo estudiando la descomposición de la celulosa.

Otra de las aplicaciones relacionadas con la captación de energía a partir de un movimiento mecánico es la textilera. En el 2020, Chaoyu Chen *et al.* [6] diseñaron un dispositivo *TENG* para la recolección de energía a partir del movimiento corporal. Este dispositivo es ligero, portable y flexible, además, genera una  $I_{sc}$  de 40  $\mu A$  y una carga en corto circuito ( $Q_{sc}$ ) de 4.47  $\mu C$  por cada ciclo de movimiento, entregando una corriente directa capaz de iluminar 416 LEDs. Por su parte, en el 2020, Twinkal Patel *et al.* [7] fabricaron un dispositivo portable, flexible y capaz de autorepararse, el cual permite la recuperación de la superficie para fines triboeléctricos. El diseño del dispositivo muestra una propiedad mecánica de fuerza de tensión de 1.7 MPa y alcanzó un rendimiento triboeléctrico de 169.9 V/cm<sup>2</sup>.

En el año 202, Quitao Zhou *et al.* [8] reportaron la fabricación de un sistema nanogenerador triboeléctrico y microfluídico para la detección de analitos en líquidos. El sistema consiste en un dispositivo que genera un voltaje como respuesta a la solución del analito objetivo que fluye a través del canal microfluídico. La aplicación involucra aplicaciones que van desde



las mediciones de concentración iónica hasta el monitoreo *in situ* de la reducción catalítica del contaminante 4-nitrofenol (4-NP). Los resultados apoyan la hipótesis de que el dispositivo propuesto tiene potencial aplicación en los campos de sensores químicos autosustentables y dispositivos electroanalíticos y en la conservación del medio ambiente.

Recientemente, Xiaoyue *et al.* [9] desarrollaron un compuesto de polidimetilsiloxano (PDMS) funcionalizado con nanotubos de carbono de pared simple y la adición de líquido iónico para incrementar sus propiedades triboeléctricas. La conductividad eléctrica relativamente alta permite que el compuesto sea capaz de transferir cargas sin electrodos y reduce la impedancia interna de las partículas triboeléctricas. Estos dispositivos *TENG* son utilizados para la recolección de energía a frecuencia ambiental  $<5$  Hz. Estas características hacen que los *TENG* sean capaces de recolectar energía mecánica de actividades humanas, como caminar, respirar, o de fenómenos naturaleza como el flujo de aire, la caída de gotas de lluvia y el impacto de las olas del océano. La densidad de potencia y eficiencia de los *TENG* sobrepasa los  $500 \text{ W/m}^2$ , demostrando que la funcionalización con grafeno incrementa el efecto triboeléctrico.



## HIPÓTESIS

Un fluido iónico fluyendo a través de un canal microfluídico dará origen a una señal eléctrica, cuya magnitud será proporcional a la concentración de iones del fluido.

## OBJETIVOS

Fabricar un dispositivo capaz de generar una señal eléctrica a partir del efecto triboeléctrico entre un fluido iónico y la superficie de un canal microfluídico, y de la inducción eléctrica.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Simular el sistema bajo estudio en un *software* basado en elementos finitos.
2. Fabricar el dispositivo propuesto con todos los componentes necesarios para su funcionamiento.
3. Realizar pruebas de funcionamiento con agua ultrapura y con solución de sudor simulado a diferentes concentraciones iónicas.
4. Obtener las curvas de corriente/voltaje y corriente/potencia con las diferentes soluciones de prueba.





## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los dispositivos de dimensiones pequeñas tienen un requerimiento energético de baja potencia y su única fuente de energía disponible son las baterías. Sin embargo, éstas tienen un período de vida corto pues deben ser recargadas o reemplazadas por unas nuevas, o en algunos casos pueden contener sustancias que resultan nocivas para la salud o para el medio ambiente. Debido a esto, resulta de interés el desarrollo de fuentes de energía alternativas de baja escala capaces de suministrar algunos cientos de milivolts (mV). La transformación de energía mecánica a energía eléctrica a partir de un fenómeno de transferencia de cargas como el efecto triboeléctrico es una manera de ofrecer este suministro energético a dispositivos de muy baja potencia. Además, si dicho efecto se implementa en conjunto con un sistema microfluídico, las posibles aplicaciones se extienden a dispositivos biomédicos de uso continuo cuya fuente energética sean fluidos corporales con alta carga iónica como el sudor.



## CAPÍTULO 1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este primer capítulo se describen los temas que permiten entender los fundamentos teóricos del proyecto desarrollado. Se abordan aspectos como el fenómeno triboeléctrico, los tipos de dispositivos *TENG*, su funcionamiento y las aplicaciones que tienen o a las que se pueden dirigir.

### 1.1.- ELECTRIFICACIÓN POR CONTACTO

La electrificación por contacto (*CE* por sus siglas en inglés) es el término utilizado para denominar el efecto en el que dos materiales de diferente origen se cargan eléctricamente después de haber entrado en contacto físico, es decir, es el efecto triboeléctrico. La fricción entre dos materiales no es estrictamente necesaria para la transferencia de carga, por lo que la *CE* coexiste con el efecto triboeléctrico, ya que éste si requiere de una fricción entre los dos materiales [10]. El mecanismo de la *CE* no se ha establecido completamente; sin embargo, se han propuesto diversos procesos que incluyen la transferencia de electrones, de iones o la transferencia de materia. Siguiendo los mecanismos anteriores, la *CE* se produce en las diferentes fases de la materia [10].

### 1.2.- MECANISMOS FÍSICOS DE LA ELECTRIFICACIÓN POR CONTACTO

#### **Interacciones sólido-sólido a altas temperaturas**

Se han realizado diversas investigaciones sobre la *CE* en materiales a altas temperaturas, resultando en que la transferencia de cargas sigue el proceso de liberación de cargas eléctricas superficiales mediante la emisión termoiónica de electrones. Este proceso satisface el modelo de Boltzmann, indicando que la transferencia de cargas aumenta con el incremento de temperatura. Además, se ha encontrado que las moléculas del agua en el ambiente impactan



el rendimiento del proceso. La máxima transferencia de cargas ocurre cuando la humedad relativa se encuentra al 0%, por el lado contrario, las cargas acumuladas se descargan si la humedad incrementa [10].

Para lograr la transferencia de los electrones se debe superar la distancia de enlace mínima requerida, un valor aproximado de 0.2 nm. Lo anterior sugiere que es necesaria una fuerza externa para lograr la fricción entre los dos materiales. En el caso del agua en el ambiente, al ser adsorbida puede causar transferencia de cargas a través de los iones  $H^+$  y  $OH$ , el ion  $OH$  tiene una carga dominante, ubicándose en las interfases su acumulación [10].

La densidad de carga superficial que se logra con la  $CE$  es de  $\approx 10^{-3} C/m^2$ . Esto corresponde a un exceso de carga de electrones en  $1600 nm^2$  de área superficial, de esta manera, la probabilidad de que ocurra la transferencia de electrones es de 1 de cada 40000 átomos superficiales; debido a lo anterior, este proceso es de gran importancia para la mecánica cuántica [10].

### **Interacciones metal-dieléctrico**

En un sistema metal-dieléctrico, el proceso de electrificación se puede describir utilizando un diagrama de bandas de energía en el que observamos los estados de ambos materiales. El metal tiene un nivel de Fermi característico, mientras que la superficie dieléctrica cuenta con una banda de conducción y una de valencia. Si el valor del límite de la banda de valencia del dieléctrico está por debajo del nivel de Fermi del metal, los defectos/estados superficiales en la banda prohibida pueden ser llenados por los electrones del metal, resultando en cargas negativas en la superficie del dieléctrico [10].

Si el metal recibe un voltaje de polarización negativo con respecto al dieléctrico, los estados superficiales en el dieléctrico serán empujados hacia niveles de energía más bajos en comparación con el nivel de Fermi del metal, resultando en más electrones transferidos desde el metal hacia el dieléctrico. Mientras que, si se aplica un voltaje de polarización positivo en el metal con respecto al dieléctrico, los estados superficiales en el dieléctrico se moverían a niveles de energía más altos (esto depende de la magnitud del voltaje de polarización),



propiciando la transferencia de electrones en los estados superficiales hacia el metal y dando lugar a cargas eléctricas positivas en el material dieléctrico [10].

### **Interacciones metal-semiconductor**

Existen dos procesos posibles para la electrificación en el caso de sistema conformado por un metal y un semiconductor. El primero indica que cuando una pieza metálica entra en contacto con una pieza de un semiconductor, se forman enlaces nuevos entre ambas superficies durante la fricción. La energía que se requiere para separar los dos materiales es equivalente a la energía de fractura de los materiales, esto indica que la electrificación se relaciona con la interacción entre las nubes de electrones de los materiales. La energía que se produce con la formación del enlace es equivalente a un cuanto de energía llamado “bindington”, el cual es capaz de excitar los pares electrón-hueco en el semiconductor y separar los electrones de los huecos por la barrera de Schottky generada, lo que genera una corriente directa. Lo anterior se denomina efecto tribovoltáico [10].

El segundo mecanismo describe la posibilidad de que un electrón del metal sea capaz de transportarse a los estados desocupados de la superficie del semiconductor, y la energía liberada puede generar el tunelamiento o transición de los electrones del metal al semiconductor. Aunque, en este caso, la energía del electrón puede no ser suficiente para excitar los pares electrón-hueco del semiconductor [10].

### **Interacciones semiconductor-semiconductor**

En este caso, se proponen tres mecanismos para explicar la electrificación de los materiales semiconductores. En el primer, los huecos y los electrones se mueven en la interfaz hacia la contraparte formando un campo eléctrico de tal manera que los niveles de Fermi se encuentren en equilibrio (mismo valor). Con lo anterior se genera una corriente interna que no se observa en un circuito externo. Cuando los materiales se separan, los huecos difundidos en el lado n pueden ser llevados a través de la carga externa hacia el lado p, dando lugar a una corriente eléctrica medible. Si los dos materiales se separan lo suficiente, el proceso se



detiene. La corriente fluye desde el lado n hacia el lado p cuando las piezas se separan por una redistribución de portadores de carga [10].

El segundo incluye un proceso de electrificación por contacto entre el lado n y el lado p, donde las cargas son formadas en ambas superficies, y el contacto y separación de los semiconductores resulta en una corriente alterna en la carga externa. Este es el mecanismo de un TENG. Mientras que el tercer mecanismo consiste en la formación de enlaces atómicos en la interfase liberando energía mediante el contacto de los dos materiales semiconductores. Dicha energía genera pares electrón-hueco a partir del efecto tribovoltáico, siendo una señal de corriente directa la que fluye del lado p al lado n cuando los semiconductores n y p han tenido un contacto [10].

### **Modelo del estado superficial en interacciones dieléctrico-dieléctrico**

En este caso, cuando los dos materiales están en contacto, algunos de los electrones se pueden transferir de la superficie de un material A hacia la superficie de otro material B por un impulso energético, resultando en la CE. Si no se induce ninguna excitación térmica o fonónica, los electrones no regresan a la superficie del material A dando lugar a cargas electrostáticas positivas netas en el material A y cargas electrostáticas negativas en el material B. Las cargas están ligadas al estado superficial y no fluyen libremente en casos generales si la conductividad de los materiales es limitada; por lo que, se espera que permanezcan sobre la superficie de forma permanente [10].

Según el modelo de emisión termoiónica, cuando se presentan fluctuaciones de energía térmica y temperaturas elevadas, los electrones ligados se pueden liberar de los estados superficiales. Este modelo de estado superficial se ha utilizado para entender el mecanismo de transferencia de cargas entre dos sólidos [10].

### **Modelo de nube de electrones traslapada**

Este modelo solo se aplica cuando la estructura electrónica del dieléctrico se puede representar con un diagrama de bandas con estados superficiales y defectos. Algunos



materiales como los polímeros y el caucho pueden representarse por orbitales moleculares en lugar de diagramas de bandas de energía, sin embargo, para materiales que carecen de estructura molecular caracterizada o con fases compuestas, no existe un modelo simple que pueda representarlos [10].

La atracción o repulsión de átomos cargados se puede interpretar a través del potencial de interacción interatómica. Para que dos átomos formen un enlace se requiere el traslape entre las nubes de electrones a una distancia específica, denominada  $a$ . Si se encuentran a una distancia interatómica  $x$  más grande que  $a$ , entonces los átomos tienden a atraerse; en este caso, el traslape entre las nubes de electrones de ambos átomos se considera insignificante, inhibiendo la transferencia de electrones. En cambio, si la distancia  $x$  es menor que  $a$ , los átomos tienden a repelerse debido al mayor traslape de las nubes de electrones, dando lugar a la transferencia de electrones [10].

Para este mecanismo, la importancia de la fricción entre los materiales radica en que disminuye la distancia entre los átomos causando el traslape de las nubes electrónicas en la región repulsiva [10].

### **Materiales químicamente idénticos**

Se ha demostrado experimentalmente que también se puede producir cargas eléctricas estáticas a través del contacto entre dos materiales químicamente idénticos, es decir, dos piezas del mismo material. Este es el caso de materiales como kapton, nylon y poliéster, entre otros, que se han diseñado con diferentes curvaturas superficiales, mostrando que las superficies cóncavas poseen cargas positivas, mientras que las superficies convexas tienden a ser negativas. Lo anterior se debe al estiramiento o compresión de las moléculas superficiales, cambiando los efectos de la energía superficial y generando estados superficiales específicos. Esta diferencia permite que los electrones pasen de una pieza de material a otro cuando entran en contacto [10].



### **Interacciones líquido–sólido**

Múltiples procesos químicos y biológicos tienen lugar en la interfaz por la transferencia de carga, esta interfase entre un líquido y un sólido es materia de estudio en catálisis electroquímica, ingeniería química y biología. Para el caso de la *CE* entre un líquido y un sólido se propone un mecanismo de transferencia de iones por el simple hecho de la presencia de iones en la solución como el hidronio ( $H^+$ ) y el hidroxilo ( $OH^-$ ) en el agua [10].

### **Interacciones dieléctrico – líquido**

La transferencia electrónica en el caso de un dieléctrico y un líquido se ve favorecida por la presencia de diversos iones en el líquido como  $H^+$ ,  $Cl^-$ ,  $OH^-$  y  $Na^+$ , entre otros. Sin embargo, la transferencia de iones depende del valor de pH de la solución, el cual domina las reacciones de ionización en la superficie del dieléctrico [10].

### **Transferencia de electrones en la formación de la doble capa**

Comúnmente, la formación de la doble capa se entiende como la formación de una capa de iones a la superficie del sólido, atrayendo a los iones de carga opuesta mientras que los de carga similar se repelen. De este modo se genera una distribución de potencial eléctrico en la interfaz líquido–sólido. Cabe destacar que este modelo solo se basa en la adsorción de iones en la interfaz sin incluir la transferencia de electrones.

Se ha propuesto otro modelo que implica dos pasos para la generación de la doble capa, en el primer paso se describe un proceso de intercambio de electrones entre las superficies de ambos materiales, uno líquido y el otro sólido, lo que genera que los átomos de la superficie del sólido se conviertan en iones [10]. En un segundo paso se presenta la interacción entre los iones de la interfaz con los iones presentes en el líquido, derivando en un gradiente de distribución de cationes y aniones alrededor de la interfaz. En lo experimental, el intercambio de electrones y la adsorción de iones puede ocurrir en un mismo instante coexistiendo en la interacción líquido–sólido. Este modelo se llama el modelo de Wang para la doble capa eléctrica [10].



El modelo clásico para la formación de la doble capa eléctrica menciona dos capas de cargas sobre la superficie del sólido. La primera capa está compuesta por iones que son físicamente adsorbidos en la superficie; la segunda capa se compone por los iones que son atraídos a la superficie debido a las interacciones de Coulomb para que el campo eléctrico sea apantallado en su totalidad. Mientras que, el líquido está formado por iones que se mueven libremente por la fuerza de las interacciones eléctricas y la temperatura en vez de permanecer estáticos [10].

El modelo de Wang, en cambio, sugiere que la superficie del sólido se encuentra intacta y sin cargas superficiales preexistentes. Solo hasta que ocurre un primer contacto con las moléculas o átomos del líquido es posible la interacción directa con los átomos superficiales del sólido formando una superposición entre sus respectivas nubes de electrones, siendo la transferencia de electrones el resultado de la *CE* en la interfase del sólido-líquido. Es necesaria la transferencia de electrones para que los átomos “neutros” sean cargados, dando lugar a la formación de los iones [10].

En un líquido varias moléculas se unen entre sí por la interacción de sus electrones formando una unidad. Esta unidad puede perder un electrón cuando se encuentra cerca del sólido, esto difícilmente se explica con los procesos tradicionales de enlace iónico o covalente, de forma similar ocurre con la estructura de bandas en un material sólido en el que la transferencia de electrones no se indica para un átomo en específico sino en la materia en conjunto. Se ha demostrado que una molécula de  $H_2O$  puede perder un electrón y convertirse en un ion  $H_2O^+$ ; sin embargo, este ion tiene duración de apenas 200 ps antes de que su descomposición de origen a los iones  $OH^-$  y  $H_3O^+$  [10]. En un segundo paso, debido a las cargas electrostáticas, los iones negativos tienden a migrar hacia la superficie formando una doble capa eléctrica. El modelo de Wang sugiere que este es el origen de la formación de la doble capa eléctrica como un resultado de la electrificación por contacto debido al intercambio de electrones [10].





### 1.3.- GENERADORES TRIBOELÉCTRICOS

Un generador triboeléctrico es un dispositivo cuyo mecanismo produce energía electrostática o eléctrica de alto voltaje mediante la transferencia de cargas por contacto entre dos materiales. Los primeros sistemas basados en la generación de energía por el efecto triboeléctrico se crearon en el año de 1880 y en 1929. El primero es la máquina de Wimshurt y el segundo el generador de Van de Graaff. Ambos acumulan las cargas electrostáticas producidas por el contacto entre un material dieléctrico y otro material liberándolas como un flujo de electrones a través de materiales conductores [11].

El generador de Van de Graaff se compone por una banda de caucho (un polímero dieléctrico) flexible que tiene un recorrido entre dos rodillos de un material diferente, uno de ellos está rodeado por una esfera metálica hueca. Al costado del rodillo inferior se colocan dos electrodos y dentro de la esfera sobre el rodillo superior. Las cargas negativas se encuentran en la superficie de la banda mientras que un acrílico se carga positivamente en la parte superior. La banda transporta las cargas negativas por la superficie interior mientras que en el rodillo superior se acumulan las cargas positivas. Debido a lo anterior, se genera un campo eléctrico con mayor fuerza cerca del electrodo; en un dado momento el campo eléctrico suficientemente grande para ionizar las moléculas del aire, y los electrones se adhieren al exterior de la banda [11].

Los modos de trabajo de un nanogenerador triboeléctrico se clasifican en cuatro mecanismos que dan lugar a una *CE* entre dos materiales: modo vertical de contacto/separación, modo de deslizamiento lateral, modo de electrodo único y modo de capa triboeléctrica independiente. A continuación, se describen cada uno de estos mecanismos.

#### **Modo vertical de contacto/separación**

Los dispositivos *TENG* con este modo de trabajo requieren que dos superficies ubicadas una sobre la otra con una distancia de separación entre ambas. Debajo del material que se encuentra en la parte inferior se coloca un electrodo, y por encima de la superficie del material que se encuentra en la parte superior se encuentra otro electrodo, de tal manera que al ejercer

un esfuerzo mecánico de manera vertical ambas superficies entren en contacto, generando cargas de origen triboeléctrico posterior a la separación (ver Figura 1) [12].

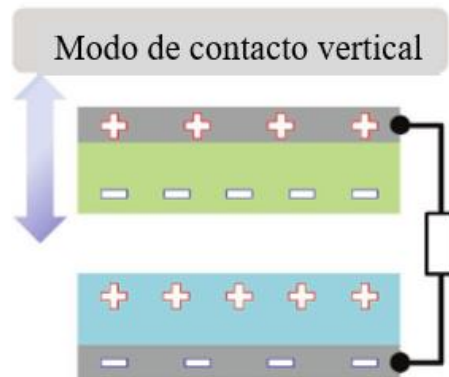


Figura 1.- Gráfico representativo del modo de trabajo de contacto vertical. Tomado de [13]

### Modo de deslizamiento lateral

En este mecanismo de transferencia de cargas, mediante un deslizamiento lateral entre dos superficies en contacto, se propicia la transferencia de cargas debido a la fricción entre ambos materiales, al tiempo que las piezas se mueven de un lado a otro en direcciones contrarias. Este es uno de los modos de trabajo más utilizados. Uno de los ejemplos más comunes es el observado cuando un globo se frota contra el cabello de una persona, en este caso la fricción entre ambos genera cargas electrostáticas (ver Figura 2) [12].

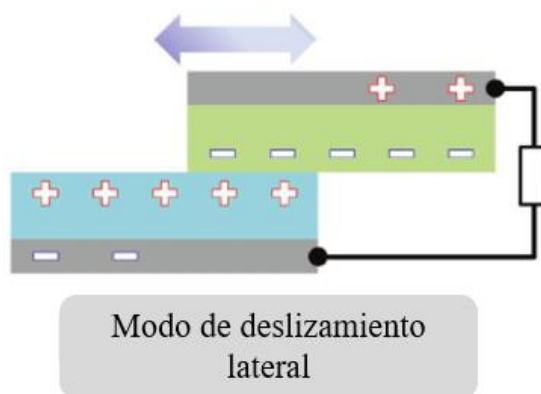


Figura 2.- Gráfico representativo del modo de trabajo de deslizamiento lateral. Tomado de [13]

### Modo de electrodo simple

En este modo de trabajo, el generador se basa en un material ubicado en la parte superior y otro en la parte inferior de naturaleza conductora desempeñando la función de electrodo, por lo que, al entrar en contacto de manera vertical o de manera lateral se generan cargas electrostáticas. Este tipo de generadores se utiliza cuando una de las superficies de contacto se encuentra en movimiento constante o que no está fijo a una base (ver Figura 3) [12].

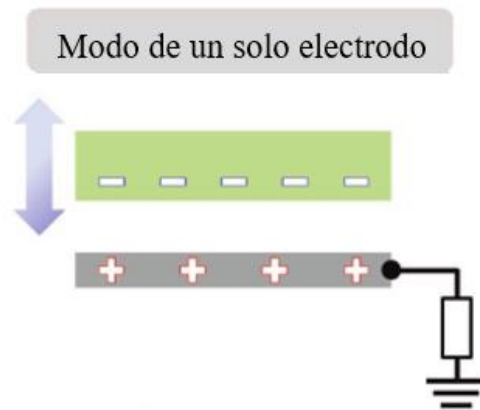


Figura 3.- Gráfico representativo del modo de trabajo de un solo electrodo. Tomado de [13]

### Modo de capa triboeléctrica independiente

De forma tradicional, al moverse una masa o un objeto, el aire se opone a este movimiento.

En la naturaleza un objeto se puede cargar por el contacto con el aire o con otro objeto. Esas cargas pueden permanecer en la superficie por horas una vez que se haya alcanzado el máximo nivel en la densidad de carga. Suponiendo un sistema que tenga una película de un material dieléctrico de un tamaño cualquiera que tenga un movimiento horizontal libre de izquierda a derecha, y se colocan por debajo dos electrodos simétricos donde su tamaño y la distancia de separación entre ambos es del mismo orden de tamaño que el dieléctrico. De tal forma que, la aproximación del objeto crea una distribución de carga asimétrica en el medio, provocando que los electrones fluyan entre los dos electrodos para equilibrar la distribución de potencial generada. En este modo de trabajo no es necesario que el objeto en movimiento tenga contacto directo con los electrodos, reduciendo el desgaste en las superficies de los nanogeneradores (ver Figura 4) [14].

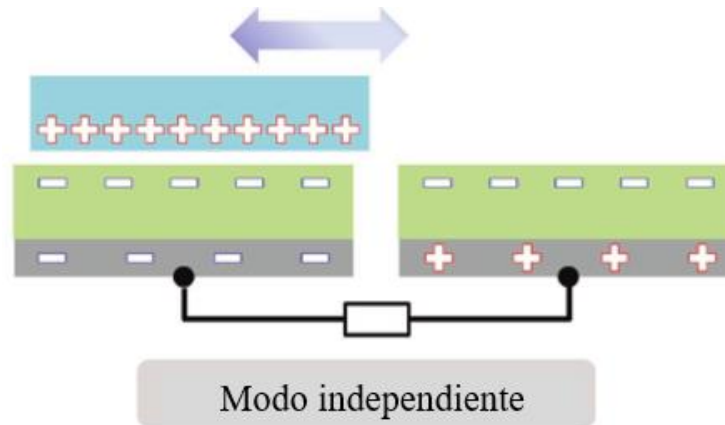


Figura 4.- Gráfico representativo del modo de trabajo de modo independiente. Tomado de [13]

#### 1.4.- MICROFLUÍDICA Y FLUIDOS

La microfluídica es un área de la ciencia que manipula los fluidos en un dispositivo con dimensiones internas que va del rango de los micrómetros hasta milímetros. El término de microfluídica aplica cuando al menos una de las dimensiones del sistema es inferior a 1 mm [14]. La microfluídica, a diferencia de la macrofluídica, toma en cuenta las propiedades de los materiales, por lo que, los efectos físicos tienden a ser predominantes a microescala. Tal es el caso de la viscosidad, cuyo papel determina el régimen del flujo laminar. Si alguna de las dimensiones del dispositivo es menor a 1  $\mu\text{m}$  se denomina nanofluídica, un dominio que corresponde al mundo donde los efectos tienen un alto impacto en el comportamiento de los fluidos o las moléculas suspendidas en ellos [14].

Los dispositivos microfluídicos o también conocidos como *chips*, tienen algunas características dimensionales: la altura tiene un rango de valores de 1 a 100  $\mu\text{m}$ ; en caudal va de los nL/s a los  $\mu\text{L/s}$ ; las velocidades están comprendidas entre los  $\mu\text{m/s}$  y los mm/s, y volúmenes desde los pL a los  $\mu\text{L}$  [14].

Algunas de las ventajas que tienen los sistemas micro y nanofluídicos es que el flujo puede ser matemáticamente modelado al ser generalmente laminar; las dimensiones de los canales son comparables a las de las células biológicas, lo que permite interacciones directas para su



cultivo y clasificación, además del monitoreo *in situ*; estos sistemas se pueden automatizar con el uso de microválvulas o microbombas; al requerir una cantidad mínima de muestra los reactivos para algunas reacciones son cantidades inferiores a las que comúnmente se utilizan, reduciendo los costos de fabricación y de insumos. Al tener un tamaño tan reducido, el tiempo de análisis es rápido, aumentando su portabilidad. De tal manera que la microfluídica tiene un papel importante para el desarrollo de la biotecnología, la medicina, la biología, la cosmética, la farmacéutica y la electroquímica, entre otras áreas de la ciencia [14].

Los primeros dispositivos microfluídicos fueron desarrollados en el año 1940 por J. St. Philpot a partir de la separación por electroforesis al combinar un flujo laminar con un campo eléctrico ortogonal, dicho sistema serviría para la separación de proteínas [14].

Por otra parte, un fluido tiene la propiedad de deformarse fácilmente estando bajo fuerzas externas, por lo tanto, su forma es dependiente del recipiente donde se encuentre, de tal manera, los líquidos y los gases se consideran un fluido. La ciencia encargada de estudiar su comportamiento es la mecánica de fluidos, ésta se divide en el estudio de los fluidos en reposo que es la estática de fluidos y en el estudio de los fluidos en movimiento que es la dinámica de fluidos. En el área de la microfluídica se trabaja con fluidos generalmente no newtonianos e incompresibles, tal es el caso de las soluciones [14].

En el estudio del comportamiento de los fluidos se utilizan diversos modelos matemáticos como la ecuación de Navier–Stokes y el número de Reynolds. Éste último se utiliza para caracterizar el régimen de los fluidos en la microfluídica, siendo un valor adimensional, y abreviado como  $Re$ , se define como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas [14]. El resultado de dicha ecuación determina uno de los tres regímenes de los fluidos, si el valor del  $Re$  es menor que 2300, el flujo se considera laminar; si el valor del  $Re$  se encuentra entre 2300 y 4000 se produce una turbulencia incompleta, o flujo de transición; si el  $Re$  tiene un valor mayor a 4000 el flujo es completamente turbulento. El valor del número de Reynolds depende de la velocidad del fluido y su viscosidad, así como la dimensión del microcanal [14].



## 1.5.- LITOGRAFÍA

El origen de la palabra litografía proviene de origen griego, donde *litos* significa piedra, y *graphia* significa escribir, su significado sería literalmente escribir sobre piedras. Para el caso de la fabricación de dispositivos microfluídicos, las piedras suelen ser obleas de silicio, o resinas fotosensibles y la escritura serían los patrones de geometrías dibujados sobre ellos [15]. La microlitografía en específico es una herramienta de fabricación de dispositivos de alta especificidad, niveles microscópicos o patrones 2D en un material fotosensible [16].

El papel de la litografía se divide en dos aspectos, uno se debe a la cantidad de número de pasos que el proceso de litografía necesita para la fabricación de un dispositivo, en el caso de la producción de circuitos integrados un 30% del costo de fabricación es el proceso de litografía. El segundo aspecto implica que el proceso de litografía tiende a tener límites técnicos para los avances en reducción de tamaños de un dispositivo [16].

El progreso de los procesos de litografía se ha dado principalmente por el interés de generar dispositivos de dimensiones cada vez más pequeñas, desde algunas micras hasta algunos nanómetros de tamaño [16]. La importancia del progreso se centra en la mejora del sistema de exposición, ésta es la pieza más compleja de los equipos de litografía, es la encargada de generar el patrón de grabado sobre la fotomáscara, la componen tres partes, que son las lentes litográficas, sistema de iluminación y el sistema de posicionamiento de obleas [16].

### **Grabado**

La obtención de microestructuras 3D es a partir del proceso de grabado, un proceso común de sustracción consta de tres pasos: (1) Deposición de una película uniforme de un material sobre un sustrato; (2) litografía para crear una imagen positiva del patrón sobre la película; y (3) grabado para transferir dicho patrón al sustrato. Mientras que un proceso aditivo cambia el orden esos pasos (1) litografía para crear una imagen negativa del patrón diseñado; y (2) deposición selectiva del material dentro de zonas no protegidas por el patrón generado por litografía [16] (Figura 5).

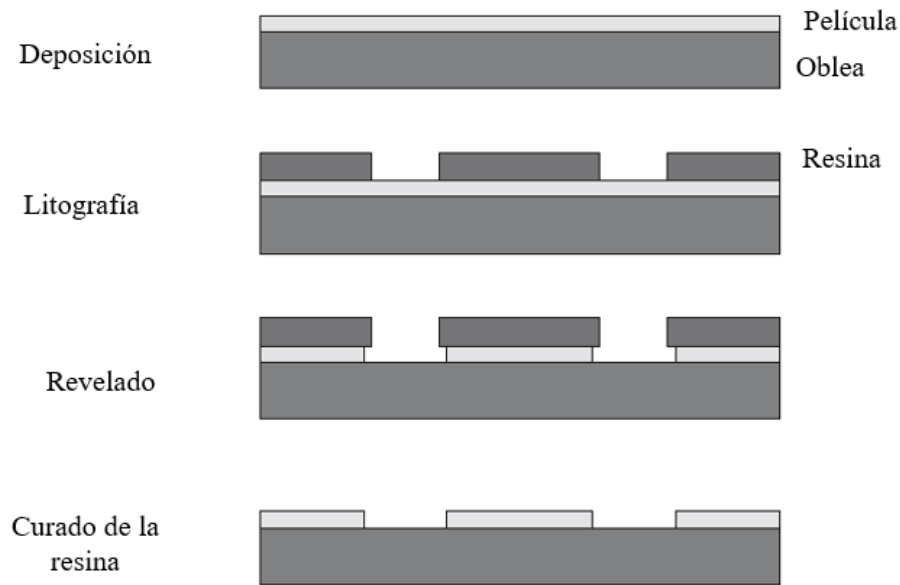


Figura 5.- Gráfico descriptivo del proceso de litografía. Tomado de [15].

### 1.5.1.- TÉCNICAS DE LITOGRAFÍA SUAVE

La portabilidad de los dispositivos se debe a los desarrollos en microelectrónica, mientras que la integración de los componentes da lugar a la reducción del tiempo de microfabricación, el costo, el tamaño de muestra, el volumen de reactivos y el consumo de energía. La fotolitografía es una de las técnicas de microfabricación más importante debido a su sistema de impresión por proyección en el que una imagen se reduce y se proyecta sobre una película de fotorresina sobre una oblea de silicio a través de un sistema de lentes. Es posible que en un futuro se puedan fabricar ópticamente elementos de hasta 100 nm. Uno de los retos en la microfabricación es el desarrollo de métodos prácticos capaces de generar las estructuras de esas dimensiones [17].

Las técnicas avanzadas que se utilizan hoy en día es la litografía UV extrema (*EUV* por sus siglas en inglés): la escritura con haz de electrones y la litografía con sonda proximal. Sin embargo, estas técnicas requieren de equipos especializados y los costes de fabricación suelen elevarse. Se ha demostrado que se pueden fabricar microestructuras y nanoestructuras



con técnicas no fotolitográficas, en las que se incluye impresión por microcontacto ( $\mu CP$ ), moldeo por réplica (*REM*), moldeo por microtransferencia ( $\mu TM$ ), micromoldeo en capilares (*MIMIC*) y el micromoldeo asistido por disolvente (*SAMIM*), denominadas *softlithography* o litografía suave porque en cada caso, un sello o molde elastomérico es el elemento clave que transfiere el patrón a un sustrato y en general, cada uno utiliza moléculas y materiales orgánicos flexibles [17].

Otra técnica que ha tomado importancia en la microfabricación es la estereolitografía, la cual permite generar un patrón a partir de un diseño en un software de diseño asistido por computadora (*CAD*). Esta técnica consiste en el curado o solidificación de un polímero fotosensible líquido irradiándolo con una fuente de luz, misma que suministra la energía necesaria para inducir la reacción de curado, uniendo las moléculas pequeñas hasta formar el polímero enlazado. El proceso de estereolitografía se divide en tres procesos de polimerización: estereolitografía convencional que se lleva a cabo con luz ultravioleta, estereolitografía IR con radiación infrarroja, y la estereolitografía [17].

Los procesos estereolitográficos transforman un prepolímero multifuncional en un polímero reticulado a través de una cadena iniciada por especies reactivas (como radicales libre o iones) generadas por la exposición a la luz. Debido a que, los monómeros o prepolímeros no producen especies iniciadoras tras la erradicación, se adicionan moléculas de bajo peso molecular o iniciadores que se activan a través del proceso fotofísico y fotoquímico [18].

El primer paso para la interacción luz-polímero es un proceso fotofísico que pone en movimiento los electrones. Una vez absorbida la luz por cualquier cromóforo, el fotón debe interactuar como un átomo o con un grupo de átomos que promueven la transición entre el estado basal y los estados de excitación. En seguida, para que la absorción tome lugar, deben cumplirse dos condiciones. La primera es que la energía del fotón  $E$ , dada por  $h\nu$  donde  $h$  es la constante de Planck ( $6.662 \times 10^{-34}$  J/s) y  $\nu$  es la frecuencia de la radiación, debe ser igual o mayor al valor de la diferencia en energía  $\Delta E$  entre el estado basal y el estado de excitación [18]. El segundo implica una interacción específica entre el componente eléctrico de la radiación incidente y la molécula, lo que resulta en un cambio del momento dipolar de la molécula durante la transición [18].



## 1.6.- NANOGENERADORES TRIBOELÉCTRICOS

Con el reciente desarrollo de los dispositivos *TENG* han surgido varias aplicaciones, debido a sus características de diseño simple, bajo costo, alta eficiencia de conversión, además de ser amigable con el ambiente y su capacidad de recolección de energía a partir de diversas fuentes de energía como el viento, el movimiento humano, o la fricción mecánica entre dos objetos [7]. Un *TENG* se puede utilizar como un sensor autosustentable para la detección de procesos estáticos y dinámicos provenientes de agitaciones mecánicas empleando las señales del potencial eléctrico de salida. Estos dispositivos se pueden integrar en la fabricación de paneles táctiles, en tecnologías de piel inteligente y textiles para la recolección de energía mecánica. Además, un dispositivo *TENG* puede aplicarse como sensor de activación mecánica, presión o estiramiento muscular, entre otros [11]. La Figura 6 resume estas ideas.

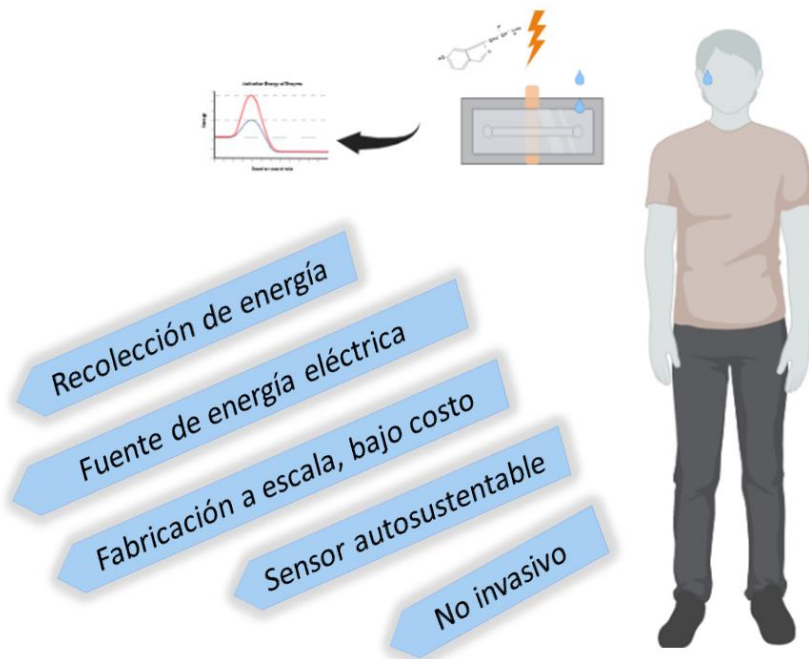


Figura 6.- Características de los nanogeneradores microfluídicos.

## CAPÍTULO 2.- DISEÑO Y SIMULACIONES

En este capítulo se describe el proceso seguido para simular el mecanismo y operación del prototipo triboeléctrico haciendo uso de métodos matemático y de las leyes de la física que simulan el efecto producido por la fricción entre dos superficies en contacto. Además, se indican las ecuaciones que el *software* aplica durante el proceso, dando como resultado una diferencia de potencial, y una densidad de carga superficial. Todo este conjunto de pasos sirve para asegurar que el sistema propuesto funciona, y al momento de analizar los resultados sean comparados con los resultados de la simulación.

En la Figura 7 se muestra el diagrama de pasos a seguir durante el proceso y los parámetros necesarios para la configuración correcta del simulador. En las siguientes páginas se detalla cada paso del proceso.

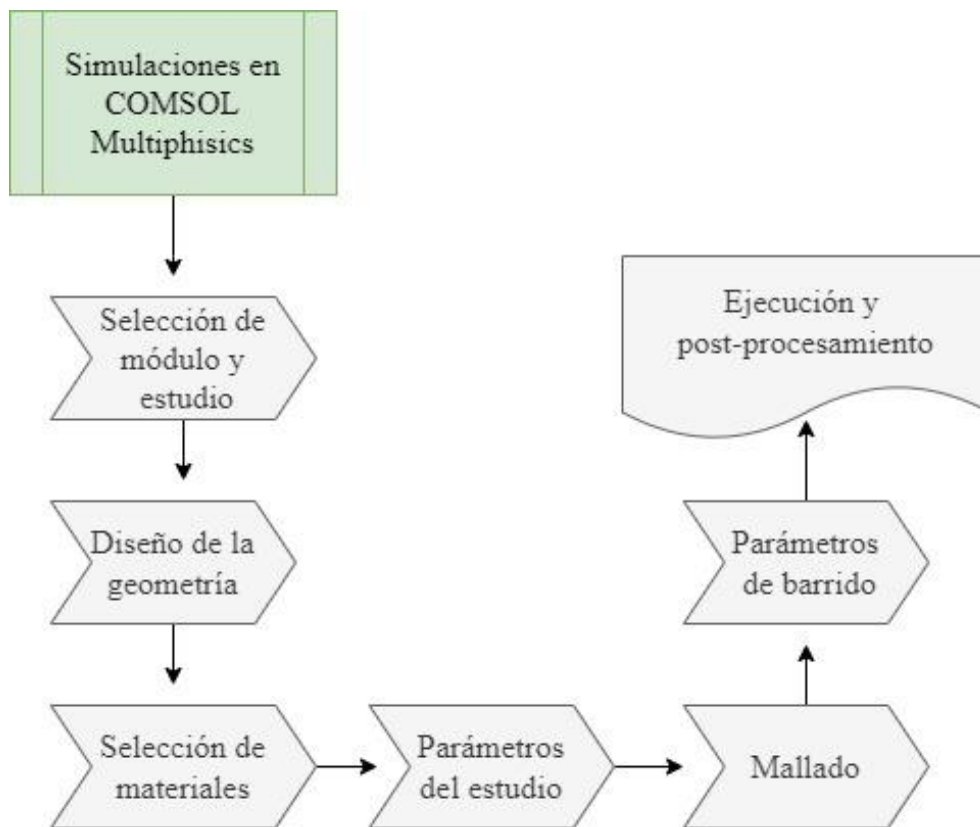


Figura 7.- Esquema del proceso de simulación del nanogenerador triboeléctrico.



## 2.1.- SELECCIÓN DE MÓDULO Y ESTUDIO

Estas simulaciones se realizaron en COMSOL, el cual es un *software* de elementos finitos que tiene la capacidad de trabajar con ocho módulos complementarios de diferentes campos de estudios, como el de acústica, ingeniería química, ciencias de la tierra, transferencia de calor, *MEMS*, radiofrecuencia, mecánica estructural y el módulo de interés para esta aplicación que es el de AC/DC [19]. Este último módulo se enfoca en el análisis de sistemas y procesos electromagnéticos de baja frecuencia basándose en las ecuaciones de Maxwell [20]. El módulo AC/DC tiene la capacidad de estudiar diversos potenciales de campo, analizando corrientes eléctricas, electrostática, magnetostática, campos electromagnéticos, maquinaria rotacional y circuitos eléctricos [20].

Dado el fenómeno de estudio en el presente trabajo, corresponden los cálculos de electrostática, ya que se aplica para componentes dieléctricos donde la corriente fluye y los campos dependen del potencial eléctrico y la distribución de la carga. Para lo anterior, es necesario realizar las evaluaciones del método de elementos finitos (*FEM*) y el método de elementos de borde (*BEM*) resolviendo el potencial eléctrico, de tal manera que se pueden obtener cantidades de matrices de capacitancia, campos eléctricos, densidad de carga y energía electrostática [20].

Una vez elegido el módulo y estudio, es necesario crear el modelo en el programa, para lo que se elige un modelo tipo 2D, éste asume en conjunto con las leyes de la física el flujo de energía, las propiedades de los materiales, el ambiente, y cualquier otra variable de interés homogéneas, isotrópicas y constantes en todo el sistema hasta que se indique lo contrario. Para los modelos 2D hay tres coordenadas, dos de espacio ( $x, y$ ) y uno de tiempo ( $t$ ), por lo tanto, los parámetros a modificar solo varían en función de la posición [19].

## 2.2.- DISEÑO DE LA GEOMETRÍA

En esta etapa de la simulación es necesario indicar las geometrías del sistema con el que se trabaja, siendo un modelo 2D y dados los componentes, se agregan rectángulos por cada uno de los materiales con los que se trabaja. Primero, se coloca la cinta de cobre como una tierra (dimensiones de 0.1 mm de altura y 20 mm de largo); por encima se agrega la geometría correspondiente al sustrato de vidrio (con dimensiones de 10 mm de altura y 20 mm de largo); en seguida, se coloca el electrodo en un punto central del sistema (dimensiones de 0.1 mm de altura y 5 mm de largo); posteriormente, se coloca la película de PDMS que funge como dieléctrico 1 (dimensiones de 100  $\mu\text{m}$  de altura y 20 mm de largo); la siguiente geometría corresponde al fluido o dieléctrico 2 (de 500  $\mu\text{m}$  de altura y 20 mm de largo). También se incorpora el PDMS que forma parte de la pared superior del canal (donde sus dimensiones son de 15 mm de altura y 20 mm de largo). Finalmente, se agrega un rectángulo de mayor tamaño que indica la presencia de aire y que además delimita los bordes del sistema (sus dimensiones son de 50 mm de altura y 100 mm de largo). La estructura completa se ilustra en la Figura 8.

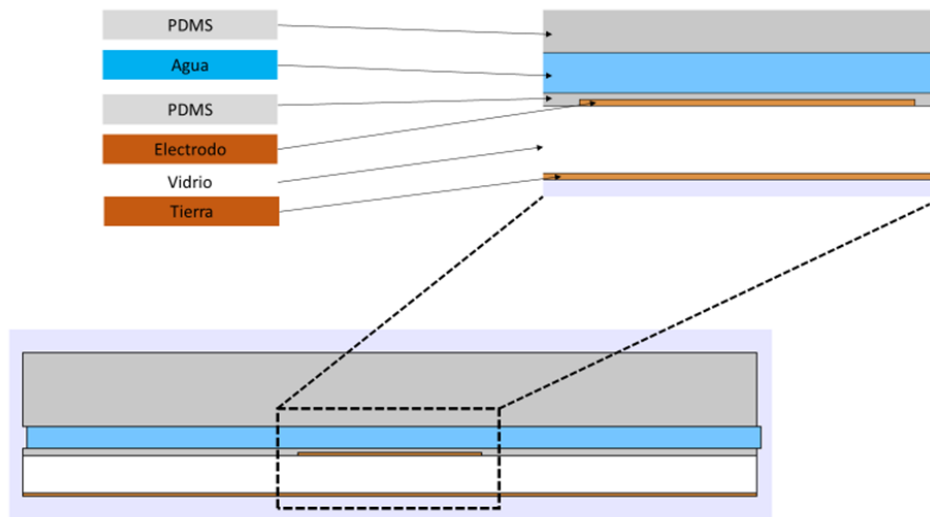


Figura 8.- Diagrama de las geometrías que constituyen el dispositivo nanogenerador triboeléctrico.



### 2.3.- SELECCIÓN DE MATERIALES

En la etapa de selección de materiales se le asigna un material específico a cada una de las geometrías que componen el dispositivo. De tal manera que el programa identifique los datos de las propiedades necesarios para el estudio. Dado lo anterior, se debe verificar que la permitividad relativa de los materiales sean los valores correctos. Algunos de los materiales como aire, vidrio y agua se pueden encontrar en la biblioteca de COMSOL, por lo que solo es necesario indicar los dominios del material. El PDMS no se encuentra en la biblioteca del *software*, por lo que se crea un material en blanco al que se le asigna a la permitividad relativa del PDMS con un valor de 2.72 [21].

En COMSOL, en el módulo de electrostática, un metal puede ser considerado un conductor perfecto, por lo tanto, la constante dieléctrica del metal es el resultado de la división del valor del campo eléctrico del vacío entre el valor del campo eléctrico en el material, y estando en un equilibrio electrostático la carga al interior del conductor es cero y su campo eléctrico interno es nulo, de este modo la constante dieléctrica del metal tiende a infinito [22]. Por lo anterior, al electrodo de cobre se le asigna un valor de permitividad relativa grande. La Tabla 1 condensa los valores de permitividad relativa de cada material empleado.

*Tabla 1.- Tabla de los materiales utilizados para la simulación y el valor de su respectiva permitividad relativa.*

Material	Permitividad Relativa
Aire	1
Vidrio	4.2
Agua	81
PDMS	2.72
Cobre	1000000



## 2.4.- PARÁMETROS DEL ESTUDIO

### 2.4.1.- DATOS Y ECUACIONES

Al ser un modelo 2D, es necesario establecer el parámetro de “distancia fuera del plano”, referente al espesor de los componentes del sistema; en este caso se le asignó un valor de 600  $\mu\text{m}$ , que corresponde al ancho del microcanal.

Este módulo de COMSOL emplea la ley de Gauss del campo eléctrico en forma diferencial, la cual relaciona la divergencia del campo con la densidad de carga eléctrica en cada punto del espacio, para esto considera como variable dependiente el potencial eléctrico (V) [23]. Las siguientes ecuaciones se encuentran por defecto en el *software* y modelan el comportamiento de cada elemento que compone el sistema, relacionando variables como la intensidad del campo eléctrico (E), densidad de flujo eléctrico (D), densidad de carga del espacio ( $\rho_v$ ), permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) y permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) [23].

Ley de Gauss:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (1)$$

Relación del campo y el potencial eléctricos:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2)$$

Conservación de la carga:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}) = \rho_v \quad (3)$$

Carga cero (aplicable al límite del sistema):

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (4)$$

Adicionalmente, se le asigna un potencial eléctrico de 0 a la tierra del dispositivo, correspondiente al segmento de cobre ubicado en la parte inferior del mismo. De igual forma, se asigna una densidad de carga superficial ( $\rho_s$ ) a los materiales que entran en contacto y generan el efecto triboeléctrico, en este caso el agua ( $\rho_s = 5 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2$ ), y la película de

PDMS depositada sobre el electrodo de cobre ( $\rho_s = -5 \times 10^{-9} C/m^2$ ); dicha carga superficial se rige por (5).

$$n \cdot (D_1 - D_2) = \rho_s \quad (5)$$

Finalmente, se asigna un potencial flotante a la superficie superior del electrodo, que es un valor equipotencial desconocido asociado con un conductor eléctrico perfecto aislado, donde el flujo a través de la superficie es cero.

## 2.5.- MALLADO

El método de elementos finitos requiere dividir la geometría diseñada en un número discreto de partes o elementos, el conjunto de dichos elementos se denomina malla. En este caso, se seleccionó una malla controlada por la física con un tamaño de elemento “más fino”, el *software* aplicó de forma predeterminada geometrías triangulares para designar los elementos, resultando en un total de 8246 elementos con una calidad mínima de 0.4346 y un área total de mallado de 5000 mm<sup>2</sup>. El resultado de este proceso se ilustra en la Figura 9.

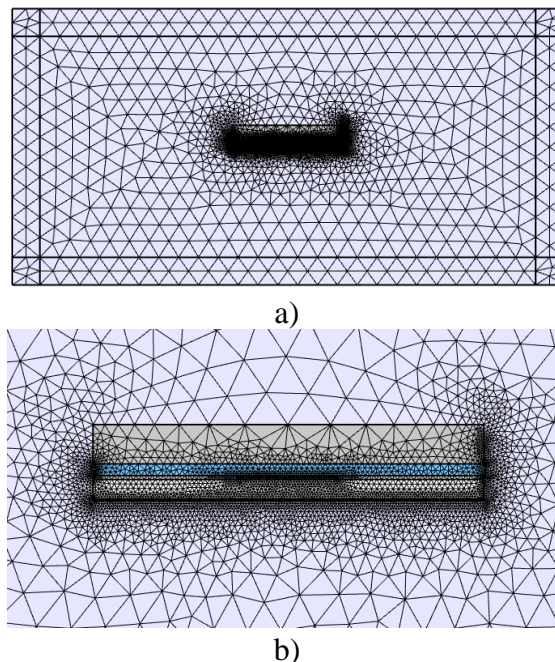


Figura 9.- Resultado del procedimiento de mallado del modelo 2D. a) Vista general y b) acercamiento.





## 2.6.- PARÁMETROS DE BARRIDO

Para el estudio se consideró como parámetro de barrido la posición del agua ( $x_1$ ), es decir que el *software* evaluaría nuevamente las ecuaciones para cada ubicación establecida, permitiendo observar el efecto del desplazamiento del fluido sobre el potencial eléctrico generado. Primero, dicho parámetro se define en la sección de “definiciones globales”, indicando su valor inicial (0.1) y sus unidades (mm); posteriormente, se agrega un estudio estacionario que contenga el barrido paramétrico, donde se asigna la posición final del elemento (21.1 mm) y los pasos que dará hasta llegar a dicha posición (3). Una vez asignados estos valores se ejecuta el estudio, que tarda aproximadamente 1 min 15 s (depende de las capacidades del sistema de procesamiento) en resolver el sistema planteado.

## 2.7.- POSPROCESAMIENTO

Entre las funciones de COMSOL se encuentra la posibilidad de realizar un posprocesamiento con los resultados obtenidos, permitiendo evaluar otras ecuaciones a nivel global o en un punto específico; obtener promedios, integrales, máximos y mínimos; generar tablas con información de interés o gráficas en 1D, 2D y 3D según sea el caso.

Se realizó un promedio de línea para obtener el potencial eléctrico promedio en la superficie del electrodo, al igual que una integración de línea para analizar la variación de la densidad de carga superficial en este mismo segmento. Adicionalmente, se generaron gráficas 2D que permiten observar la variación de la distribución de potencial en todo el dispositivo conforme varía la posición del fluido.



## 2.8.- RESULTADOS

Las gráficas 2D de la distribución de potencial obtenidas del barrido demuestran como incrementa el potencial conforme el líquido tiene contacto con el PDMS, cuando el sistema apenas está en contacto, se tiene una variación de potencial que va de 0 a -0.16 V (ver Figura 10). En el estudio se asignó una distancia de 21 mm de distancia total (longitud del canal microfluídico fabricado), una vez que la sección del fluido avanza a una distancia de 9 mm la distribución del potencial tiene una variación de 0 a -0.16 V (ver Figura 11). Por su parte, en la Figura 12 se puede observar que el fluido recorrió 21 mm de distancia y en este punto se da la separación entre el fluido y la superficie del PDMS, por lo que la distribución de potencial que va de 0 a -3.5 V. El intercambio de cargas se inicia desde que las dos superficies entran en contacto, pero la transferencia total se puede calcular una vez que se han separado los materiales.

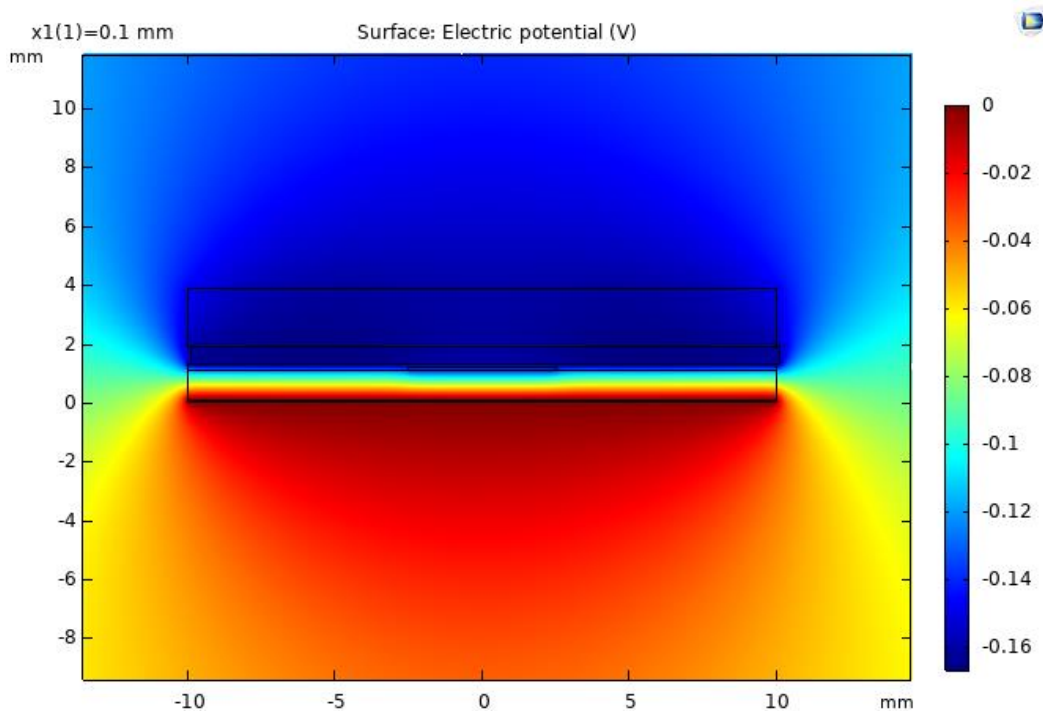


Figura 10.- Diagrama de la distribución de potencial obtenidas del barrido a 0 mm recorridos por el líquido.

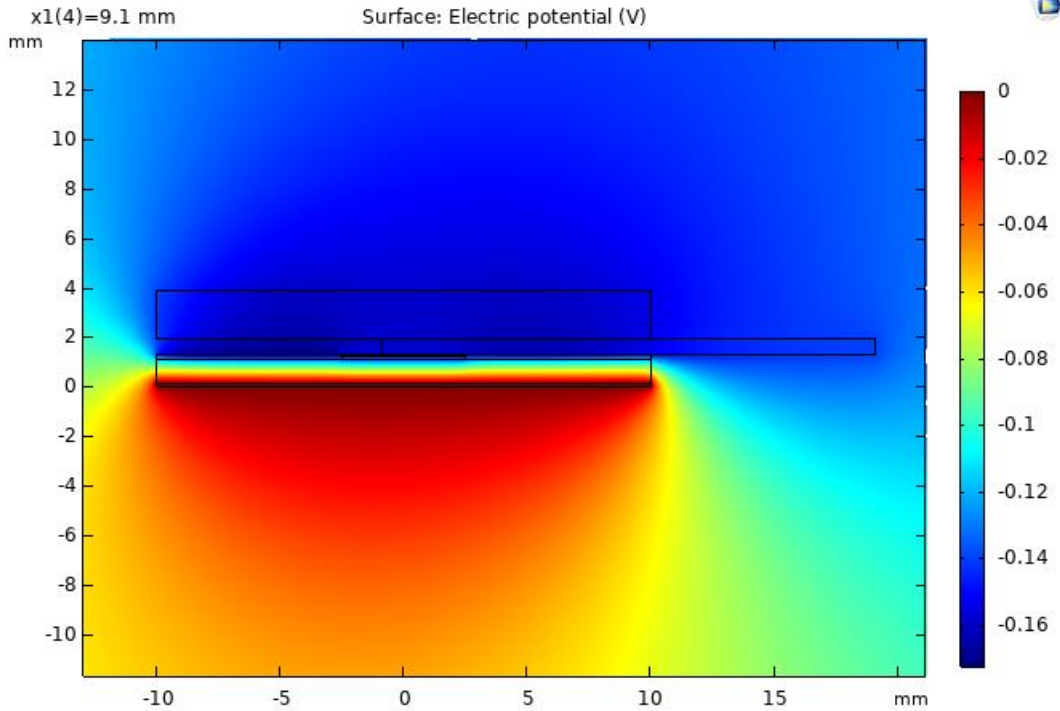


Figura 11.- Diagrama de la distribución de potencial obtenidas del barrido a 10 mm recorridos por el líquido.

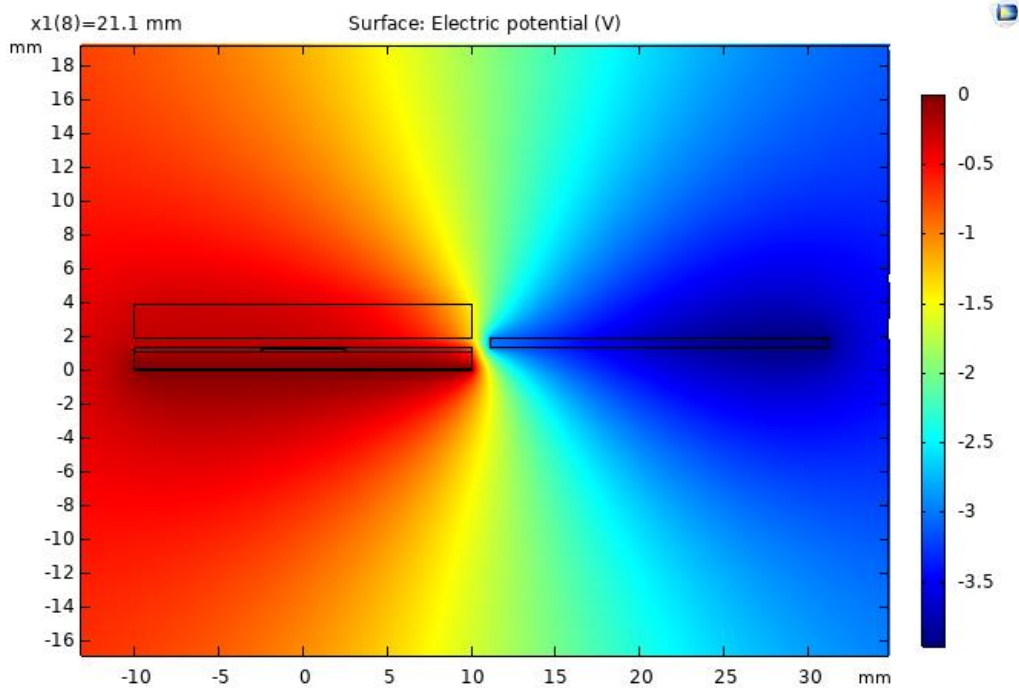


Figura 12.- Diagrama de la distribución de potencial obtenidas del barrido después de 20 mm recorridos por el líquido.

Una vez que se tienen los datos de la distribución de potencial del sistema tras el contacto entre el agua y el PDMS, se calcula el promedio de la diferencia de potencial en la superficie del electrodo, justo donde se ha indicado un potencial flotante. En ese dominio se aplica un promedio de línea, resultando en un valor promedio de la diferencia de potencial generado entre el electrodo y la tierra del sistema conforme el fluido avanza sobre la superficie de PDMS. La Figura 13 muestra los valores de la diferencia de potencial obtenida en las simulaciones que van desde  $-1.3 \times 10^{-1}$  hasta  $-1.7 \times 10^{-1}$  V.

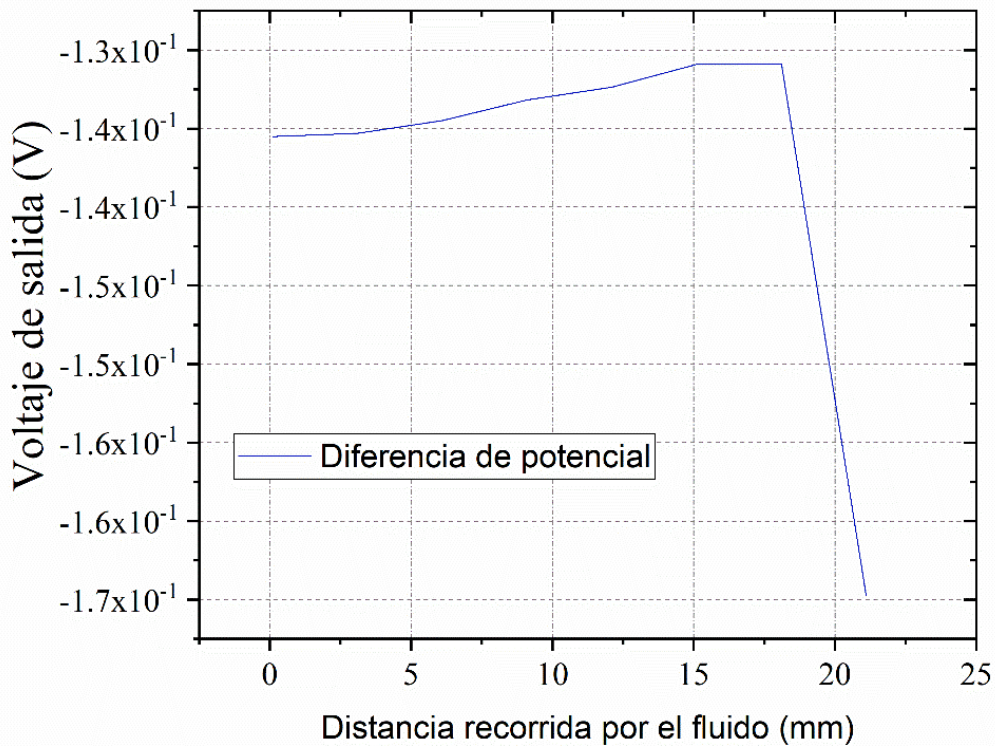


Figura 13.- Gráfico de la diferencial de potencial obtenido con respecto de la distancia recorrida por la solución.

Por otra parte, la densidad de carga superficial indica la cantidad de Coulombs por  $m^2$  que son transferidos mientras el fluido tiene contacto con el PDMS hasta que hay una separación entre ellos. Los datos obtenidos de las simulaciones se muestran en la Figura 14, donde la densidad de carga superficial va desde un valor de  $-4.0 \times 10^{13} C/m^2$  hasta aproximadamente  $-7.0 \times 10^{13} C/m^2$ .

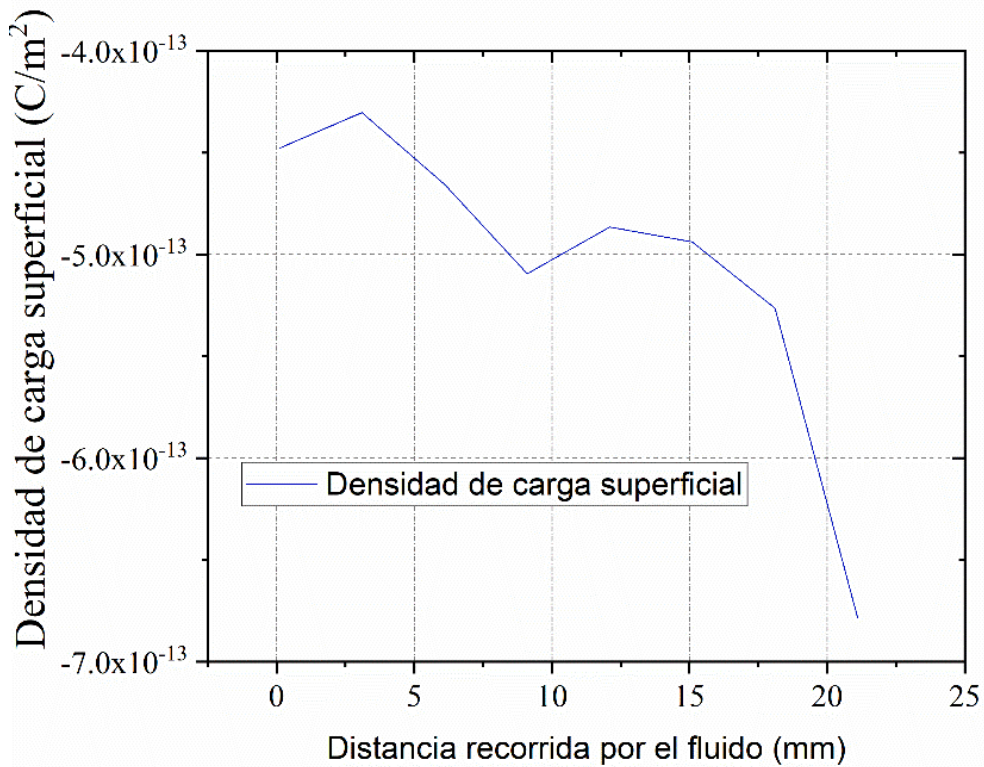


Figura 14.- Gráfico de la densidad de carga superficial resultante de la electrificación por contacto entre el PDMS y el agua.

## 2.9.- CONCLUSIONES

La simulación del dispositivo permite obtener una estimación de la densidad de carga superficial que se puede transferir entre el agua y el PDMS en un área determinada, mientras que en la práctica los resultados son similares a lo obtenido en la simulación, indicando que las propiedades eléctricas dadas a los materiales son correctas. Esto permite a su vez estimar la densidad de carga de otros fluidos ya que no hay una forma experimental de obtener esos datos.

Por otro lado, las simulaciones demuestran que el sistema propuesto para este proyecto es capaz de generar una diferencia de potencial a partir del efecto triboeléctrico entre el agua y el PDMS como materiales dieléctricos, obteniendo una densidad de carga superficial máxima de hasta  $-6.7825 \times 10^{-13}$  C/m<sup>2</sup> y una diferencia de potencial eléctrico aproximada de 180 mV.

## CAPÍTULO 3.- FABRICACIÓN

Este capítulo detalla los pasos seguidos para lograr la fabricación del prototipo del sistema nanogenerador, como se observa en la Figura 15, el dispositivo se compone de vidrio como sustrato, cintas de cobre como electrodos, una película y un microcanal de PDMS, mismos materiales utilizados para las geometrías en las simulaciones en COMSOL. En la Figura 16 se muestra un diagrama de los procesos que se realizan para poder obtener ese prototipo de nanogenerador. Cada uno de estos pasos se describen a detalle en las siguientes secciones.

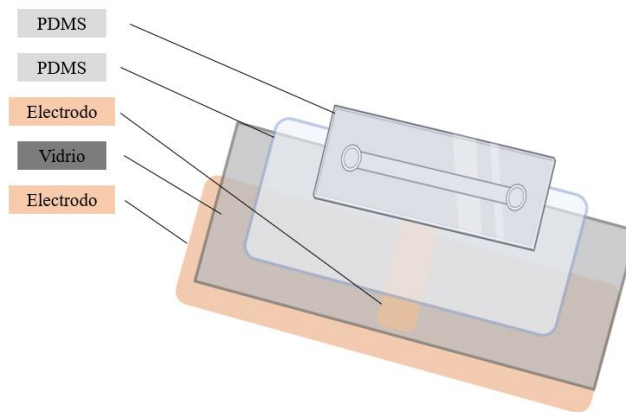


Figura 15.- Diagrama de los componentes del dispositivo nanogenerador.

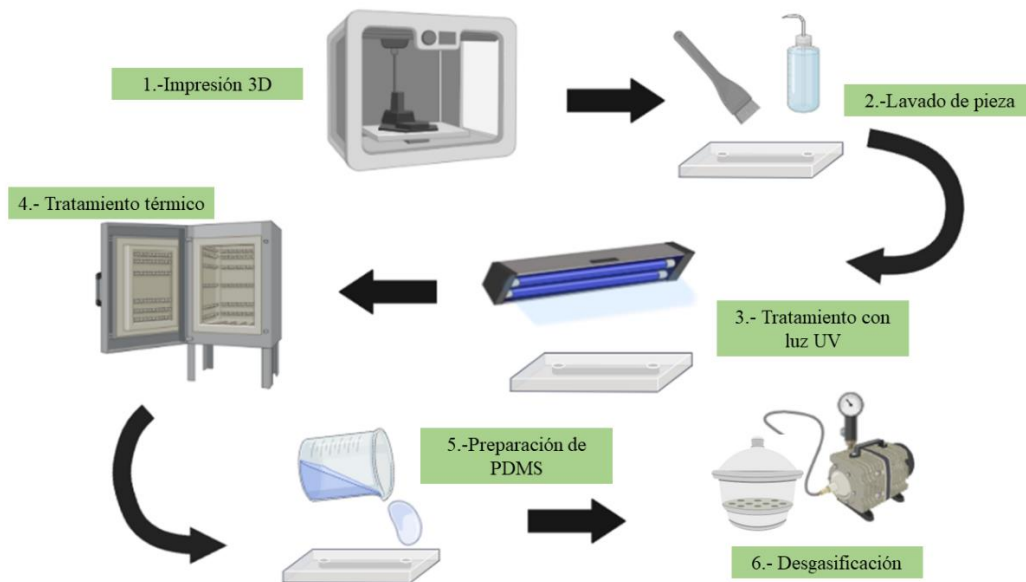


Figura 16.- Diagrama general de los procesos de fabricación del dispositivo.



### 3.1.- PREPARACIÓN DE PDMS

El PDMS se prepara a partir de la mezcla entre el agente A o base del polímero dimetilsiloxano (SYLGARD™ 184 SILICONE ELASTOMER) y un agente B o curador (SYLGARD® 184 SILICONE ELASTOMER CURING AGENT) en una relación de 10:1 gramos. Los insumos de la mezcla se muestran en la Figura 17. Primero, se pesa el agente A y se calcula la cantidad necesaria para agregar el agente B. Una vez pesados ambos agentes, se mezclan por agitación manual. A continuación, se desgasifica la mezcla en una cámara de vacío durante 20 minutos (ver Figura 18).



Figura 17.- Fotografía de los reactivos utilizados para la preparación del PDMS.

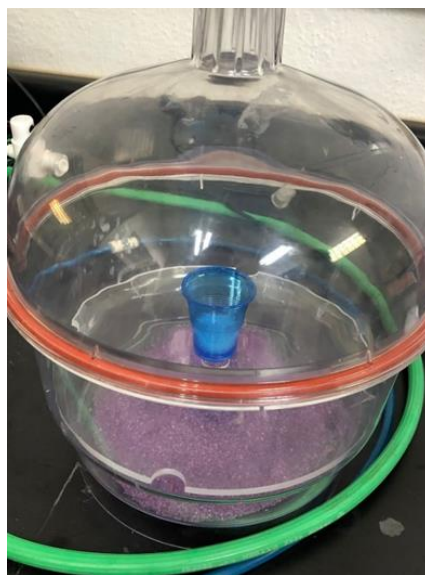
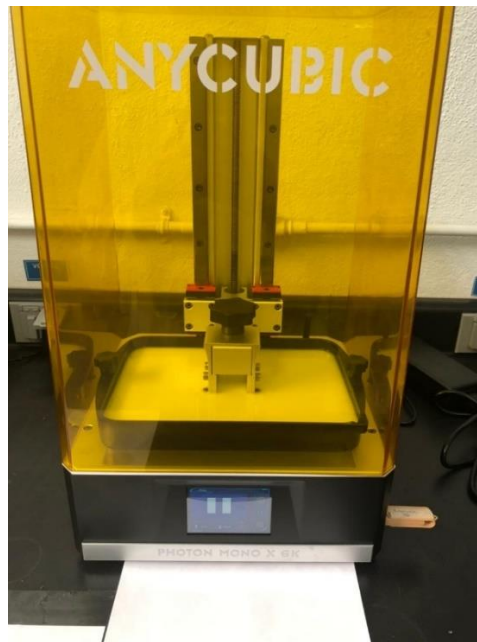


Figura 18.- Fotografía de la cámara de vacío utilizada para la desgasificación del PDMS.

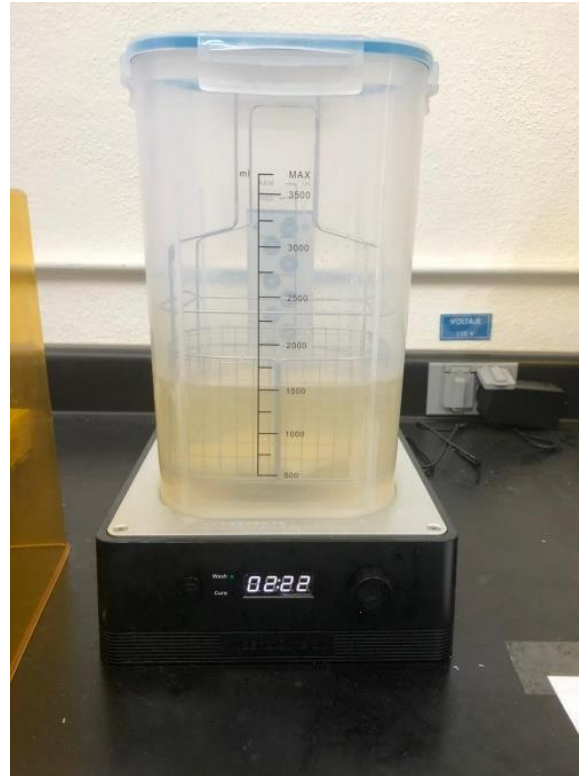
### 3.2.- DISEÑO Y FORMACIÓN DE LOS CANALES

El diseño de los canales microfluídicos se realizó en el *software* SolidWorks. Esto, básicamente, consistió en la generación de una pieza rectangular (molde) con canales con las dimensiones requeridas para el prototipo. Una vez diseñado el molde, éste se fabrica por impresión 3D en la impresora PHOTON MONO X 6K manufacturada por ANYCUBIC (ver Figura 19). Para lograr esto se insertó un dispositivo de almacenamiento masivo (USB) con el diseño del molde y se ejecutó la impresión del molde en resina 3D Printing UV Sensitive Resin manufacturada por ANYCUBIC. Este procedimiento tardó alrededor de 1 hora, en concordancia con las dimensiones del molde. Terminada la impresión, se dejó escurrir la resina de la pieza y de la plataforma de base un tiempo aproximado de 30 minutos, y se procedió a desprender el molde de la base.



*Figura 19.- Fotografía del equipo de impresión 3D (ANYCUBIC, PHOTON MONO X 6K).*

El siguiente paso consistió en un lavado del molde en etanol (Sigma Aldrich,1009832500) en el baño Wash and Cure 2.0 manufacturado por ANYCUBIC (ver Figura 20) que utiliza unas aspas que se mueven magnéticamente formando turbulencia dentro del recipiente para remover los residuos de resina sin curar.



*Figura 20.- Fotografía del equipo de lavado de moldes (ANYCUBIC, Wash and Cure 2.0).*

Dado que el molde no queda totalmente polimerizado y que sus componentes podrían afectar el proceso de polimerización del PDMS, el molde se sometió a un tratamiento en luz UV para completar el curado de la resina. Este proceso también se llevó a cabo en el equipo de curado Wash and Cure 2.0 de ANYCUBIC durante 5 minutos (ver Figura 21). Una vez finalizado este proceso el molde quedó con las propiedades requeridas para la preparación de las tapas de PDMS con canales grabados.



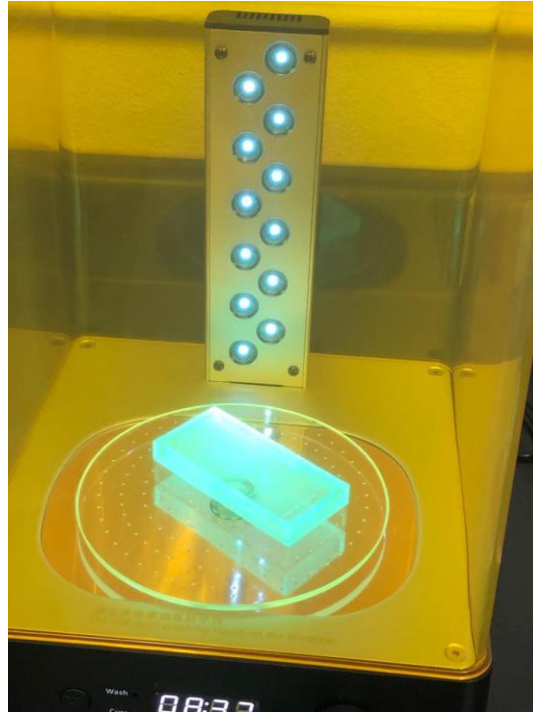


Figura 21.- Fotografía del equipo de curado con luz UV (ANYCUBIC, Wash and Cure 2.0).

### 3.3.- OBTENCIÓN DE PELÍCULA DE PDMS

Como se evidenció en la Figura 15, el prototipo incluye una cinta de cobre y una película de PDMS. La cinta de cobre (c-Cu, Steren, PT-300) de 0.1 mm de espesor, 5 mm de ancho y 3 cm de largo se pegó pasando por el centro del sustrato de vidrio (SAIL BRAND, GS7105). La deposición de esa película se realizó por la técnica de *spin coating*. Para ello se preparó nuevamente PDMS (5 gramos), siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.1. Una vez preparado el PDMS, éste se vertió sobre la superficie del sustrato de vidrio con la cinta de cobre y se hizo girar a 500 rpm durante 30 segundos con rampas de ascenso y frenado de 100 rpm/s empleando el equipo SPECIALITY COATING SYSTEMS, 6800 Spin Coater Series. La Figura 22 muestra el equipo durante la ejecución de este procedimiento. Luego, se le aplicó un tratamiento térmico a 90°C durante 15 minutos en la parrilla Precision Hot Plate manufacturada por Electronics Micro System Ltd con el fin de completar el proceso de polimerización, solidificar la película de PDMS y mejorar la adherencia de la película (ver Figura 23).



Figura 22.- Fotografía del equipo de spin coating (SPECIALTY COATING SYSTEMS, 6800 Spin Coater Series).



Figura 23.- Fotografía del plato de calentamiento para tratamiento térmico del PDMS depositado sobre el vidrio.

### 3.4.- UNIÓN POR PLASMA

Una técnica que permite la unión entre dos piezas de PDMS es el de tratamiento en plasma además de que por su naturaleza las superficies que se unen entre sí estarán en limpieza.

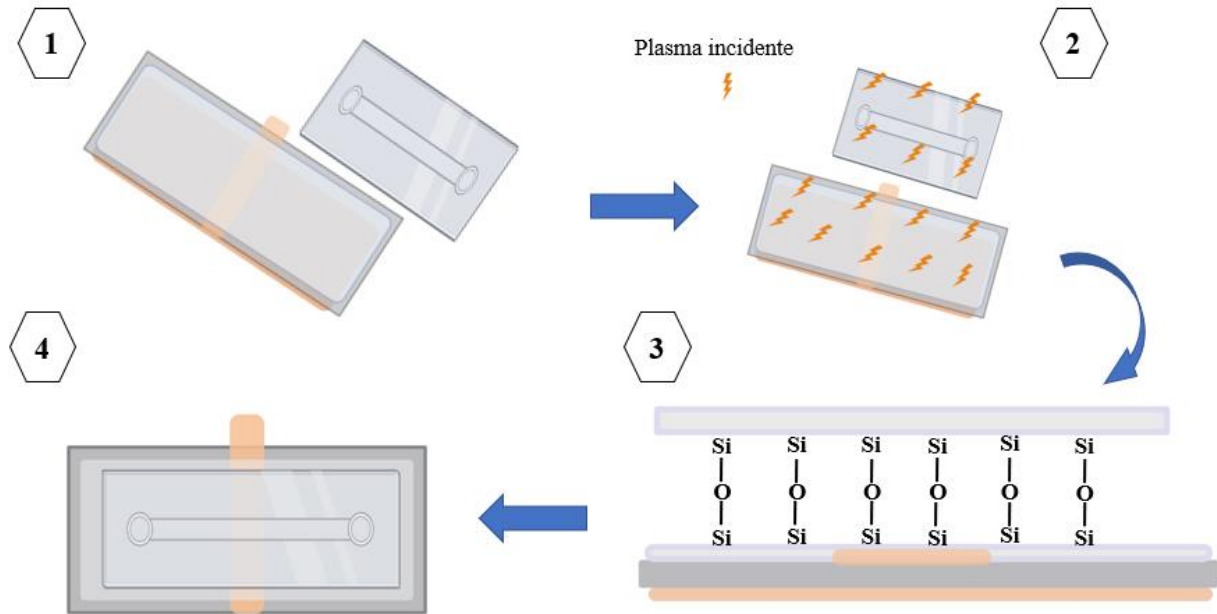


Figura 24.- Diagrama representativo del proceso de adherencia de PDMS- PDMS mediante plasma. 1) Piezas de PDMS que se introducen boca arriba en el equipo, 2) incidencia del plasma sobre las superficies a unir, 3) unión de PDMS-PDMS a través de enlaces covalentes siloxanos, 3) dispositivo completamente unido.

Para unir la tapa de PDMS que tiene el microcanal y la película depositada sobre el vidrio es necesario que ambas piezas hayan polimerizado completamente, se debe evitar el contacto con otras superficies ya que se pueden adherir impurezas. Esta técnica se utiliza debido a que el plasma por su naturaleza (iones, electrones y luz UV) es capaz de oxidar la superficie del PDMS exponiendo los grupos silanol de ambas superficies, cuando ambas piezas se unan formarán enlaces covalentes siloxanos (Si-O-Si) (ver Figura 24) [24]. Este procedimiento se llevó a cabo en el equipo Medium Plasma Cleaner manufacturado por MTI CORPORATION (ver Figura 25). El proceso inició con la incorporación de la tapa de PDMS y el arreglo sustrato/c-Cu/PDMS en la cámara del equipo, en el segundo paso se cerró la cámara y se generó un vacío de  $7.0 \times 10^{-1}$  torr. Una vez alcanzado este nivel de vacío, se encendió la

fuelle para formar el plasma ambiental a una potencia media (30 W). El tratamiento en plasma se llevó a cabo durante 20 segundos; finalizado este tiempo, se sacaron las piezas de la cámara del equipo y se unieron inmediatamente. Con el propósito de generar las vías de ingreso y salida de fluidos por el microcanal, la tapa de PDMS fue perforada previamente, tal y como se muestra en la Figura 26.



Figura 25.- Fotografía del equipo de limpieza por plasma donde se realiza la adherencia de la película con la tapa con canal microfluídico de PDMS (MTI CORPORATION, Medium Plasma Cleaner).



Figura 26.- Fotografía de la perforación de entrada y salida de fluido en el canal de PDMS.

### 3.5.- PREPARACIÓN DE SUDOR SIMULADO

En la Figura 27 se observa el diagrama general para la elaboración de la solución de sudor simulado. Esta solución se preparó a partir de cloruro de sodio (NaCl), cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y ácido láctico ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ) con concentraciones de 20, 17.5, 5.0, 2.5 y 14.2 g/L, respectivamente. El pH de la solución se ajustó a un valor de 4.5 utilizando hidróxido de sodio (NaOH) utilizando un potenciómetro digital SENSION™ manufacturado por Hach. El arreglo para esta medición se muestra en la Figura 28.

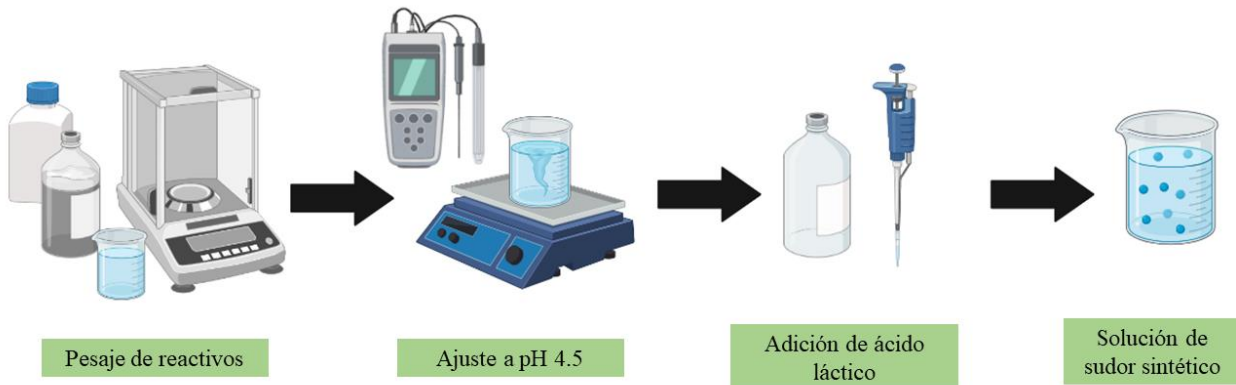


Figura 27.- Ilustración del flujo del proceso de preparación de la solución de sudor simulado.





*Figura 28.- Fotografía del potenciómetro HACH, SENSION TM utilizado para el ajuste de pH de las soluciones de sudor simulado.*

### 3.6.- PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En primera instancia, se corroboró que el prototipo fabricado estuviera libre de fugas, garantizando que la tapa de PDMS estuviera adherida a la película de PDMS. Dado que el PDMS es transparente, se utilizó una solución de agua ultrapura con colorante vegetal de tonalidad azul, misma que se inyecta por una de las entradas para el fluido. La Figura 29 ilustra el resultado de una de estas pruebas sobre uno de los prototipos fabricados. Mediante este procedimiento se pudo verificar que el colorante fluía a través del canal sin derramarse a través de los sitios de unión y sin acumularse en alguna zona a lo largo del microcanal, propiciando un flujo discontinuo.

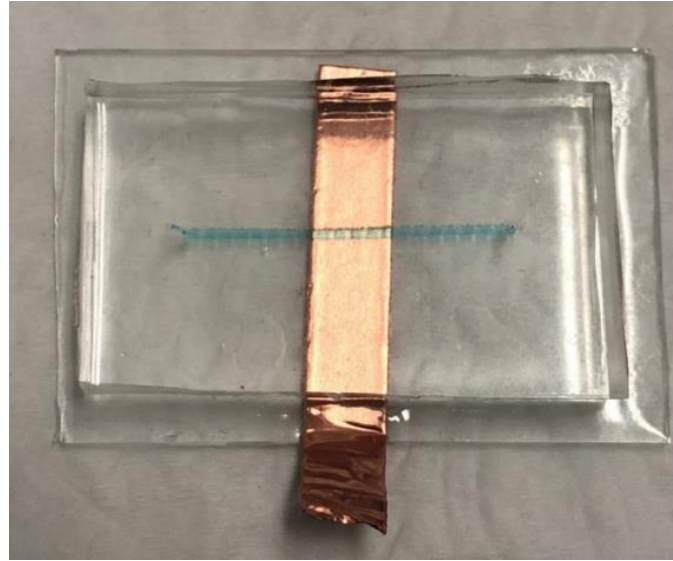


Figura 29.- Fotografía de la prueba de funcionamiento del prototipo TENG con colorante azul.

### 3.7.- MEDICIONES CON EL OSCILOSCOPIO

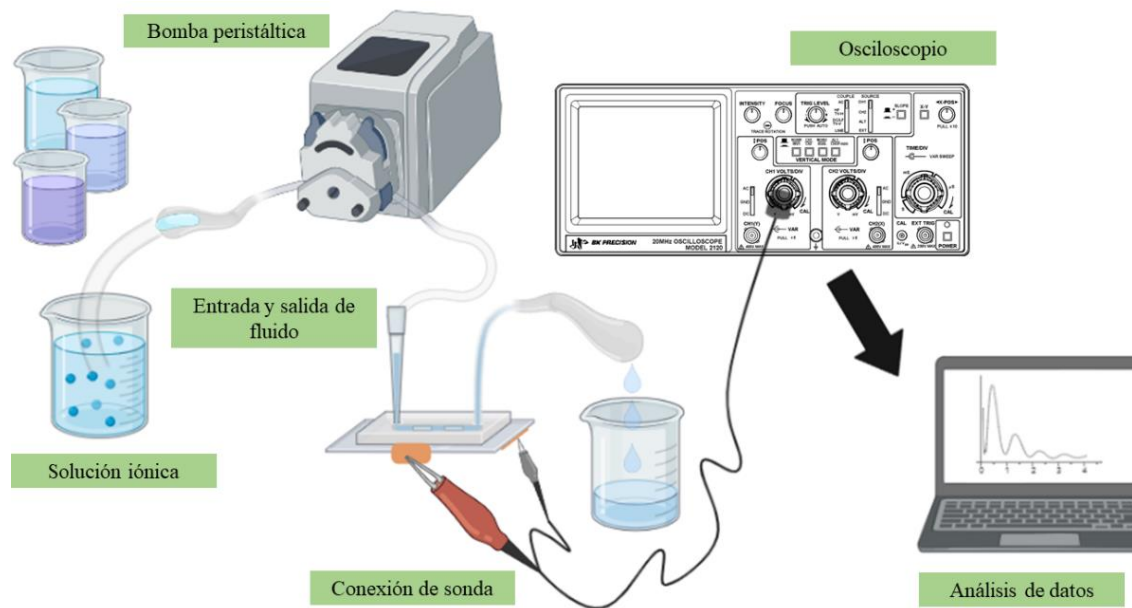
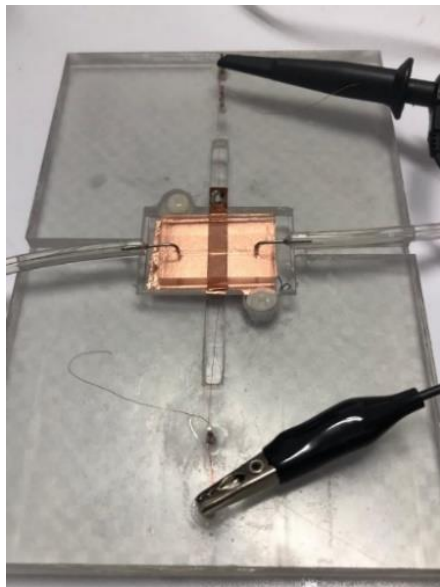
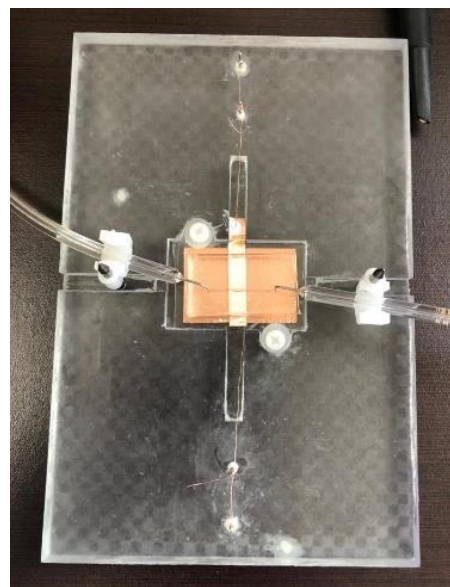


Figura 30.- Diagrama general del proceso de medición de la diferencia de potencial obtenida del prototipo TENG.

Para las mediciones de diferencia de potencial se utilizó un osciloscopio TDS 2012C TWO de la marca TEKTRONIX. La Figura 30 muestra el arreglo experimental para el desarrollo de las pruebas experimentales de funcionamiento del prototipo de *TENG*. La sonda del osciloscopio se conecta entre el electrodo y la tierra del prototipo (ver Figura 31 a)). Los parámetros de configuración de la pantalla del osciloscopio fueron 200 mV en la escala vertical y 10.0 ms en la escala horizontal. Para suministrar el flujo al prototipo se utilizó Tubin MasterFlex L/S 13 con un diámetro interior de 0.8 mm y un diámetro externo de 4 mm (ver Figura 31 b)), que previamente se instaló en el cabezal de la bomba peristáltica de velocidades MasterFlex easy-load de la marca Cole Parmer (ver Figura 31).



a)



b)

*Figura 31.- Fotografías de a) la conexión del osciloscopio y b) la inyección de fluidos al microcanal del prototipo TENG.*

### 3.8.- CONCLUSIONES

El proceso de fabricación de estereolitografía mediante impresión 3D es una opción económica y eficaz para la obtención de los moldes para canales microfluídicos con dimensiones superiores a los 50  $\mu\text{m}$  gracias a la resolución del equipo de impresión, dando lugar a la fabricación de canales con diferentes geometrías y dimensiones deseadas. Gracias a los beneficios de la impresión 3D de los moldes es posible obtener una producción a gran





escala y con un costo reducido en comparación con la fabricación con equipos de fotolitografía.

En la fabricación de microcanales para nanogeneradores una superficie que tenga geometrías o rugosidades que provoquen turbulencia del fluido es una modificación que permite aumentar el contacto entre el fluido y la superficie del PDMS lo que posiblemente resulte en una mayor diferencia de potencial.

Otro proceso importante en la fabricación es la unión de PDMS-PDMS mediante plasma ambiental, la adhesión completa entre la película de PDMS y el microcanal es fundamental para el funcionamiento del dispositivo, ya que la presión ejercida dentro del canal por el fluido podría provocar la ruptura de las piezas de PDMS.

Finalmente, todos los procesos de fabricación realizados permitieron obtener un dispositivo de calidad y completamente funcional, se propone que el funcionamiento del nanogenerador no es limitado, ya que no se observó un desgaste tras realizar la experimentación con las diferentes soluciones.

## CAPÍTULO 4.- RESULTADOS

En el presente capítulo es un compendio de los resultados obtenidos durante el proceso de experimentación del proyecto. Se presentan resultados adicionales obtenidos de modificaciones al diseño principal del prototipo *TENG*, así como los resultados de su caracterización usando agua DI, agua de grifo, sudor simulado y sudor real.

### 4.1.- FABRICACIÓN DE MOLDES DE MICROCANALES RANURADOS

Se realizó una modificación al diseño inicial del microcanal, insertando ranuras que simulan ondulaciones micrométricas en la pared superior. Aplicando la técnica de impresión 3D se fabricaron moldes de las tapas de PDMS con dimensiones de 2 cm de ancho, 3 cm de largo y 0.4 cm de altura, mientras que los canales microfluídicos tienen un espesor de 600  $\mu\text{m}$  y una altura de 500  $\mu\text{m}$ . Como se mencionó en la sección 3.2, los moldes una vez impresos requieren lavados con etanol (Sigma Aldrich, 1009832500) o isopropanol (JTBAKER, 9084) para prevenir que los residuos de la resina fotosensible parcialmente polimerizados interactúen con el PDMS, así como el tratamiento en luz ultravioleta que ayuda a que la resina superficial endurezca completamente. El molde resultante se muestra en la Figura 32.



Figura 32.- Fotografía del molde obtenido mediante impresión 3D después de los tratamientos de curado.

A pesar de que los moldes solidificaban adecuadamente, el PDMS que se encuentra en contacto con la resina no curaba completamente, por lo que al extraer las tapas quedaron zonas con relieve inestable, mismas que se convertirían en obstáculos al paso del fluido como se puede observar en la Figura 33. Recientemente Venzac Blasten *et al.*[25] estudiaron el comportamiento del PDMS en diferentes tipos de resinas. Inicialmente, ellos plantearon un tratamiento de luz ultravioleta; sin embargo, al realizar mediciones químicas sobre la superficie de los moldes se encontraron restos de la resina (oligómeros) que no se evaporan completamente, por lo que, se inhibe la polimerización del PDMS. Esto conlleva a la realización de un tratamiento térmico de los moldes posterior al curado.



*Figura 33.- Fotografía del canal microfluídico que no ha polimerizado completamente.*

Se hizo un tratamiento térmico a 80 °C para los moldes impresos en 3D durante 4 horas con el objetivo de eliminar los residuos de la resina que inhiben la polimerización. Tras el tratamiento térmico la resina es más dura al tacto, sin llegar a deformarse. El PDMS logró polimerizar tras un tratamiento térmico a 80°C durante 1 hora en horno de calentamiento, resultando en celdas completamente polimerizadas y con paredes lateras lisas como se muestra en la Figura 34.



Figura 34.- Fotografía del canal microfluídico de PDMS obtenido del molde que ha recibido un tratamiento térmico.

#### 4.2.- MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA PELÍCULA DE PDMS

La técnica de *spin coating* permite obtener una película homogénea sobre el sustrato depositado. En este proyecto fue necesario generar una película de PDMS de 100  $\mu\text{m}$  de espesor. Después de realizar varias pruebas a varias velocidades de deposición, dicha película se obtuvo bajo los parámetros de proceso resumidos en la sección 3.3, y mediante un tratamiento térmico a 90°C durante 6 minutos. La caracterización de la película se hizo mediante mediciones de perfilometría con el perfilómetro Dektak 6M. La Figura 35 muestra una de las mediciones de una de las películas obtenida bajo los parámetros de fabricación mencionados, en ella se observa que se alcanzó el espesor deseado de 100  $\mu\text{m}$ .

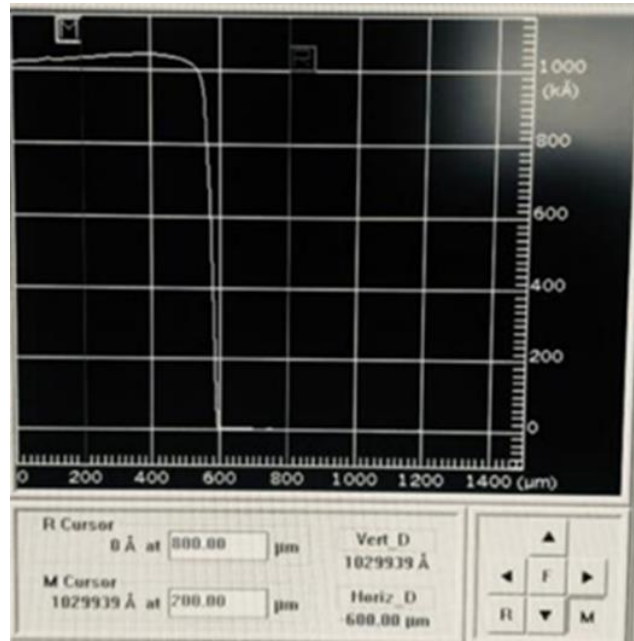


Figura 35.- Gráfico obtenido de la medición en perfilometría de la película de PDMS de 100  $\mu\text{m}$  depositada sobre vidrio.

#### 4.3.- FUNCIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS

Para todos los prototipos fabricados fue necesario realizar las pruebas de funcionamiento, de tal manera que ninguno presentara fugas de fluido, ya sea entre la unión de la película de PDMS y el canal o entre las salidas de fluido. Cualquier fuga era indicativa de que la tapa de PDMS y la película de PDMS no se habían adherido en la totalidad del área de interés, por lo que el dispositivo no era apto para realizar pruebas de operación. La Figura 36 muestra algunos de los resultados de estas pruebas de funcionamiento.

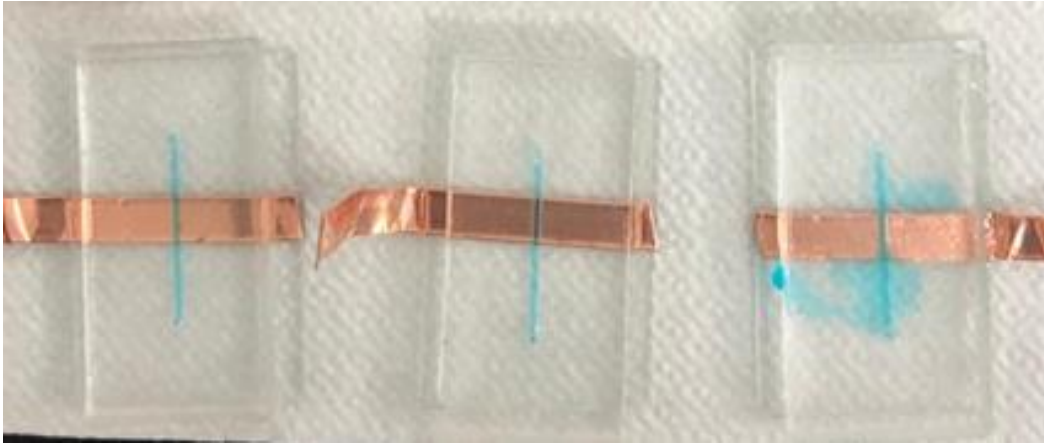


Figura 36.- Fotografía de prototipos sometidos a prueba de funcionamiento para comprobar fugas en el microcanal.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la técnica de adhesión mediante tratamiento con plasma ambiental demostró ser suficiente para lograr la adhesión de las superficies de PDMS y satisfacer los requerimientos para las pruebas de operación de los prototipos. Se encontró que modificaciones en los parámetros de fabricación presentados en la metodología condujeron a resultados inviables. Además de que el tratamiento superficial con plasma es una técnica muy sencilla, también se logra que las superficies no presenten cambios en su morfometría, asegurando que la superficie de contacto inferior del canal se encuentra en las condiciones deseadas para un correcto funcionamiento.

#### 4.4.- ANÁLISIS DE PRUEBAS EN OSCILOSCOPIO

Una de las ventajas de la medición con un osciloscopio es que permite visualizar en el tiempo los ciclos de los procesos de acumulación de carga en la interfase fluido/PDMS, permitiendo observar los máximos y mínimos picos a través de la medición de la diferencia de potencial de las pruebas *in situ*. En otras palabras, al momento de realizar las pruebas se observan las señales correspondientes a la diferencia de potencial entre los electrodos; además, el osciloscopio permite almacenar los datos de la señal obtenida. Dado lo anterior, los resultados arrojados por el equipo se procesaron en un *software* (Origin Pro<sup>®</sup>) que permite graficar y



analizar los datos generados por el osciloscopio con el fin de obtener gráficas comparativas de las pruebas realizadas con diferentes fluidos.

En este proyecto, las pruebas se realizaron con agua y con solución de sudor sintético, el cual se obtuvo según la metodología indicada en la sección 3.5. El agua y la solución fueron inyectadas utilizando una bomba peristáltica COLE PALMER modelo MASTERFLEX® L/S ECONOMY DRIVE que se muestra en la Figura 37, un tubin L/S 13 y un osciloscopio TEKTRONIX modelo TDS 2012C TWO.



*Figura 37.- Fotografía de la bomba peristáltica (COLE PALMER, MASTERFLEX® L/S ECONOMY DRIVE) utilizada para la inyección de las soluciones en el sistema microfluídico.*

#### **4.4.1.- OBTENCION Y FILTRADO DE SUDOR HUMANO**

El sudor de origen humano se obtuvo de un voluntario, mismo que fue filtrado y almacenado a -4 °C para su conservación y realización de pruebas con el dispositivo. Se midió el pH del sudor y se encontró en un valor de 7.0, valor que es comúnmente encontrado en personas. La obtención de sudor es un procedimiento no invasivo para la persona. La recolección se realizó en un tubo Falcon de 15 mL de volumen; posteriormente se utilizó una jeringa y papel filtro para eliminar residuos de piel muerta, pelusa o moléculas contaminantes como el polvo. Una



vez filtrado el sudor, éste se ocupó en las pruebas de operación y caracterización del prototipo *TENG*. La muestra se hizo circular a diferentes velocidades a través del canal microfluídico. Adicionalmente se evaluó el desempeño bajo diferentes valores de carga simulados con resistencias comerciales. Con los resultados de estas caracterizaciones se logró obtener las curvas de potencia contra corriente o voltaje.

#### 4.4.2- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES CON EL OSCILOSCOPIO

En las primeras pruebas de caracterización del prototipo *TENG* se utilizaron soluciones de agua desionizada DI, agua de grifo, soluciones de sudor simulado con concentraciones de ácido láctico de 0, 10, 30, 50 y 70 mM y con sudor de origen humano. Las pruebas consistieron en inyectar las soluciones a través del microcanal por medio de la bomba peristáltica, mientras que el osciloscopio se conecta a los electrodos del prototipo. Se trabajó con las velocidades de flujo de 3.5, 8.0, 13.5, 18.0 y 23.5 mL/min. De las mediciones del osciloscopio, se tomaron los máximos y mínimos de la diferencia de potencial obtenidos conforme pasaban las soluciones en el microcanal.

Se realizó un cálculo en la aplicación digital Elveflow ([elveflow.com](http://elveflow.com)) que permite conocer la presión, el flujo, la velocidad y el número de Reynolds de acuerdo con las características del microcanal, resultando en que todos los parámetros anteriores aumentan conforme aumenta la velocidad de flujo. Uno de los aspectos más importantes es que las velocidades de flujo de 3.5, 8.0 y 13.5 mL/min resultaron en un flujo de tipo laminar, mientras que para las velocidades de 18.0 y 23.5 mL/min el flujo es de tipo estado de transición. La Figura 38 ilustra estos tipos de flujo.



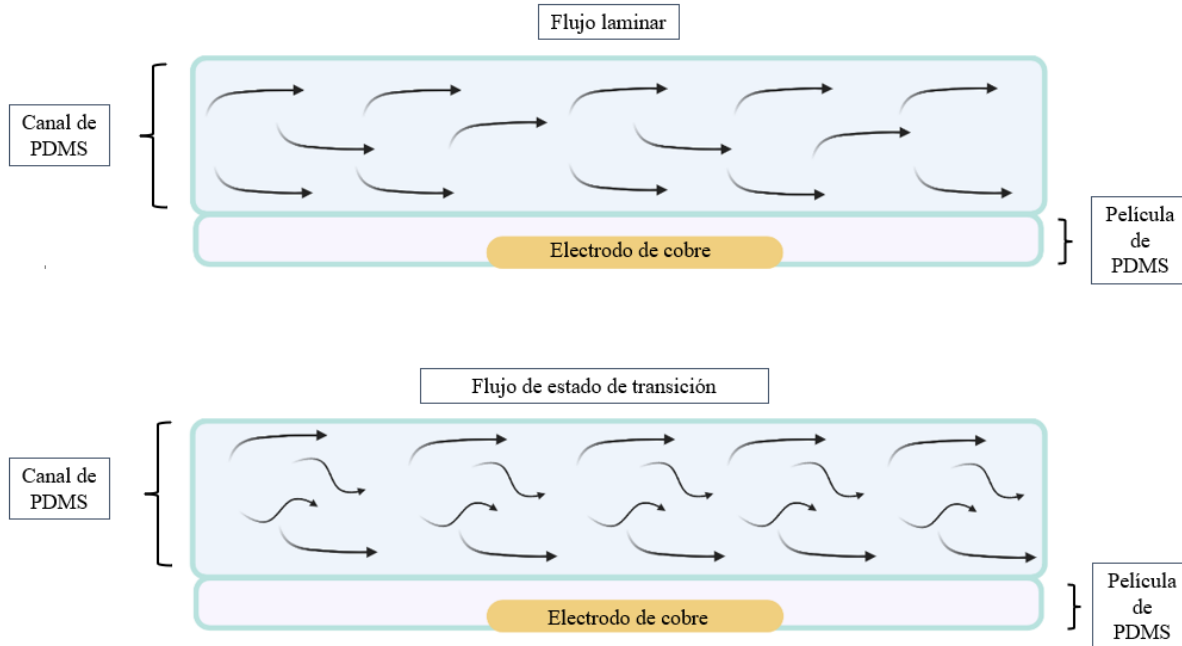


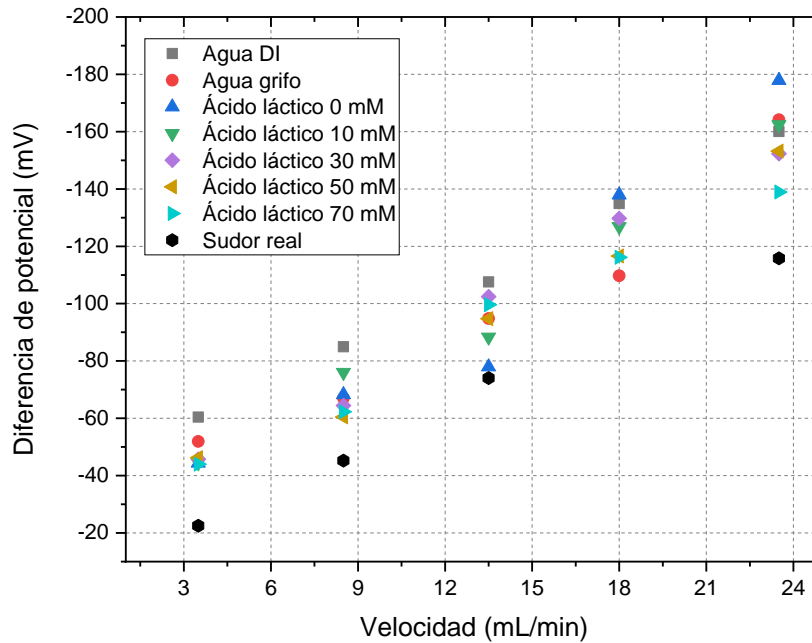
Figura 38.- Diagrama ilustrativo del tipo de flujo laminar (imagen superior) y flujo de estado de transición (imagen inferior).

El agua DI al carecer de un soluto se utilizó como blanco, se esperaba que la diferencia de voltaje resultante fuera casi nula, pero al ser procesada se queda sin cationes de sodio, cobre, hierro, calcio, y aniones como el cloruro, el fluoruro, carbonato y otros más; sin embargo, el agua DI contiene aún el ion hidrógeno ( $H_3O^+$ ,  $OH^-$  y  $H^+$ ), por lo que se propone que el efecto triboeléctrico entre el PDMS y el agua DI se deba a la presencia de dichos iones.

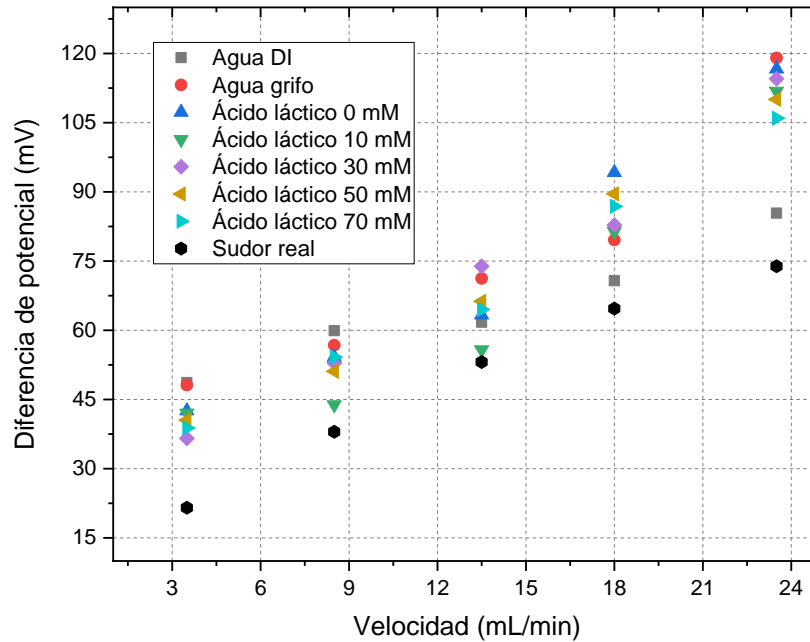
En la Figura 39.a se puede observar el comportamiento de la diferencia de potencial entre los electrodos del prototipo *TENG* contra la velocidad de flujo para las diferentes soluciones que se utilizaron en la experimentación. Todos los resultados muestran una tendencia de incremento en la señal detectada correspondiente a la diferencia de potencial respecto a la velocidad de flujo con la que son inyectadas en el microcanal. Sin embargo, se esperaba que las soluciones de sudor simulado con diferentes concentraciones de ácido láctico resultaran en una diferencia de potencial en incremento entre sí con relación al aumento de concentración. A partir de las velocidades de 13.5, 18.0 y 23.5 mL/min se observa en las soluciones de sudor simulado que a medida que aumenta la concentración de ácido láctico, las diferencias de potencial disminuyen, por lo que, se propone que el valor de la diferencia

de potencial esté relacionado con el pH de cada solución. Además, estas velocidades son propias de un tipo de flujo de estado de transición y no un flujo laminar, por lo cual propician un incremento en la presión dentro del microcanal, lo que obliga a los iones a viajar al azar, generando una *CE* mayor que en las velocidades de 3.5 y 8.5 mL/min que corresponden a un tipo de flujo laminar.

La transferencia de los electrones entre una solución acuosa y un sólido se debe a la sensibilidad a solutos como el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$  y  $\text{H}^+$ , entre otros. Mientras que la transferencia de iones es principalmente afectada por el pH de la solución, dominando las reacciones de ionización en las superficies aislantes. Según el modelo de la doble capa eléctrica de Wang, la electrificación de la superficie dieléctrica tiende a atraer los iones de carga contraria. Dado que el área de contacto es reducida, la carga superficial llega a un punto de saturación por lo que resultan diferencias de potencial positivas casi equivalentes a la diferencia de potencial negativo (ver Figura 39.b).



a)



b)

Figura 39.- Gráficos de la diferencia de potencial con respecto a la velocidad de flujo para cada tipo de solución. a) Diferencia de potencial negativo y b) diferencia de potencial positivo.

La *CE* es un fenómeno que depende de muchos factores y de las propiedades de los materiales; además, al ser una interacción sólido-líquido, los fenómenos ocurridos en la interfase de ambos materiales son complejos y variados. En este trabajo se propone que por la naturaleza del PDMS, los electrones disponibles en la solución sean transferidos en un primer instante a la superficie del PDMS, por lo que, su carga neta será negativa. De tal manera que los iones  $H^+$  serán atraídos a la interfase líquido-sólido, formando una doble capa eléctrica que provoca que los iones de carga contraria sean direccionados a la parte superior del canal, a este efecto lo denominaremos adsorción de iones  $H^+$ . Este mecanismo se ilustra en la Figura 40.

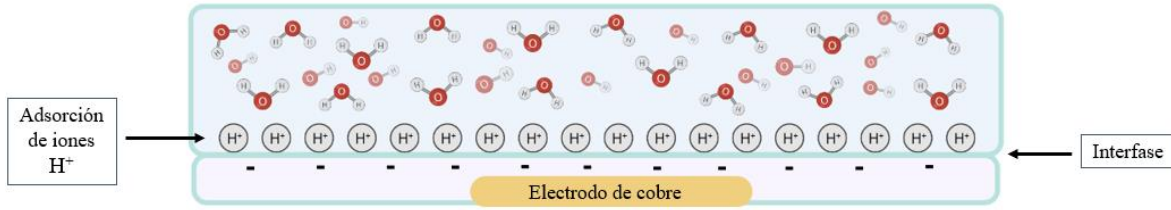


Figura 40.- Diagrama ilustrativo del proceso de adsorción de iones  $H^+$  en la interfase PDMS/fluido.

Desde un punto de vista eléctrico, el nanogenerador diseñado, por su propia estructura, se asemeja a un capacitor. Considerando el sistema bajo condiciones de circuito abierto, la acumulación de los iones  $H^+$  en la interfase por la atracción a la superficie con carga negativa del PDMS genera un campo eléctrico positivo que atrae los electrones del electrodo 1 hacia la parte superior del electrodo derivando en la acumulación de cargas positivas en la parte inferior del electrodo. Debido a lo anterior, electrodo 2 se carga negativamente mediante la acumulación de electrones provenientes de la tierra (ver Figura 41).

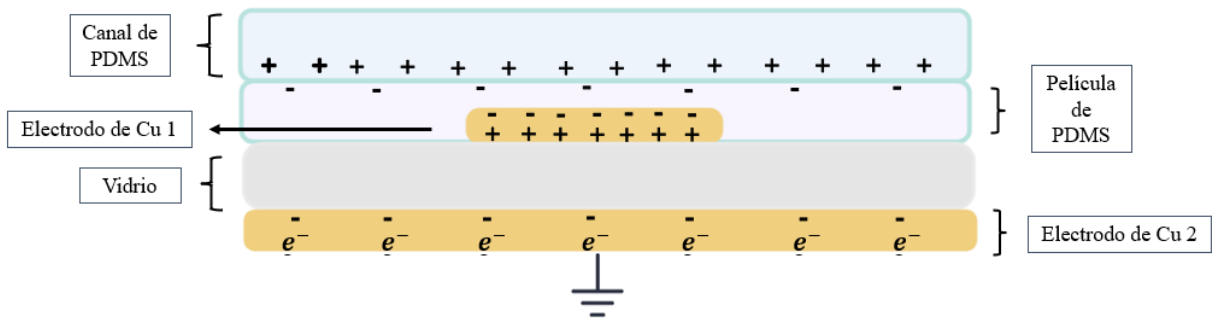


Figura 41.- Diagrama ilustrativo de la generación de un voltaje en circuito abierto.

En condiciones de carga, se considera que ahora el capacitor estará conectado a una resistencia entre los electrodos, por lo tanto, ocurre un fenómeno como el mencionado anteriormente, donde la adsorción de los iones  $H^+$  genera un campo eléctrico que atrae los electrones a la parte superior del electrodo 1, y en esta ocasión los electrones fluyen del electrodo 2 hacia el electrodo 1 para compensar la carga en la interfase PDMS/fluido, resultando en una corriente  $i$  que va del electrodo 1 hacia el electrodo 2 (ver Figura 42). Se propone que este proceso genera los picos positivos obtenidos en las mediciones con el osciloscopio.

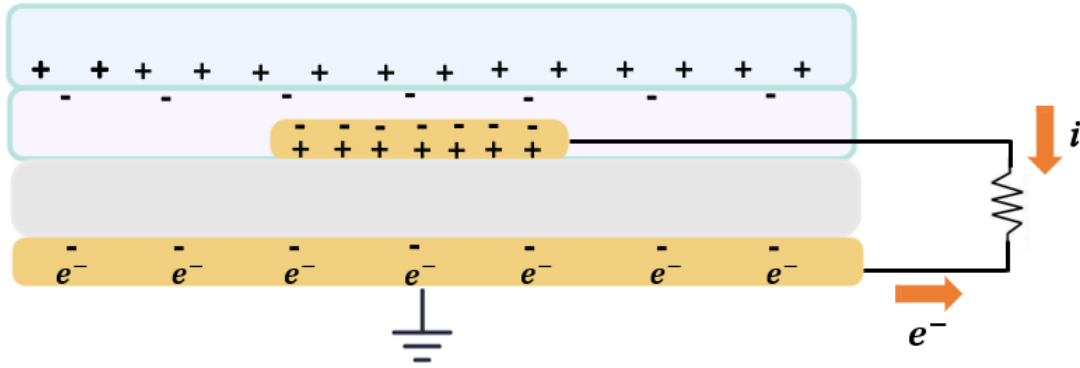


Figura 42.- Diagrama ilustrativo de la diferencia de potencial en el nanogenerador bajo carga, propuesto para los picos negativos.

Como se mencionó en párrafos anteriores, los resultados de la diferencia de potencial en el osciloscopio son picos negativos y positivos, por lo que, se propone que la adsorción de los iones  $H^+$  es temporal, conforme el fluido sigue la trayectoria del canal, las fuerzas físicas y eléctricas del caudal son capaces de separar los iones atraídos a la interfase, por lo que la nueva sección de fluido dejará la interfase sin la doble capa, efecto que denominaremos desorción de iones  $H^+$  (ver Figura 43), posteriormente otra sección de fluido nuevamente podrá generar la doble capa con nuevos iones  $H^+$ , propiciando oscilaciones de carga positiva a negativa y viceversa en la interfase PDMS/fluido.

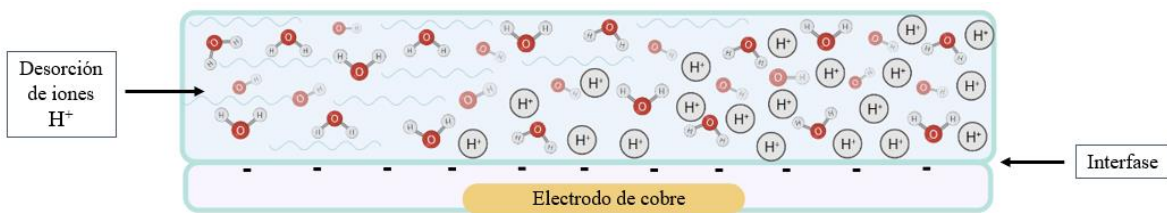


Figura 43.- Diagrama ilustrativo del proceso de desorción de iones  $H^+$  de la interfase.

Este efecto también se puede describir en términos eléctricos, donde la desorción de los iones  $H^+$  provoca que la carga negativa del PDMS sea la que influye en la orientación de las cargas internas de los electrodos que se conectan a través de la resistencia. Por lo que, las cargas negativas se acumulan en la cara inferior del electrodo 1, y el flujo de electrones ahora será del electrodo 1 hacia el electrodo 2, por lo que la corriente irá del electrodo 2 hacia el

electrodo 1. De tal manera, se plantea que los picos negativos se deben al efecto de desorción de los iones  $H^+$  (ver Figura 44).

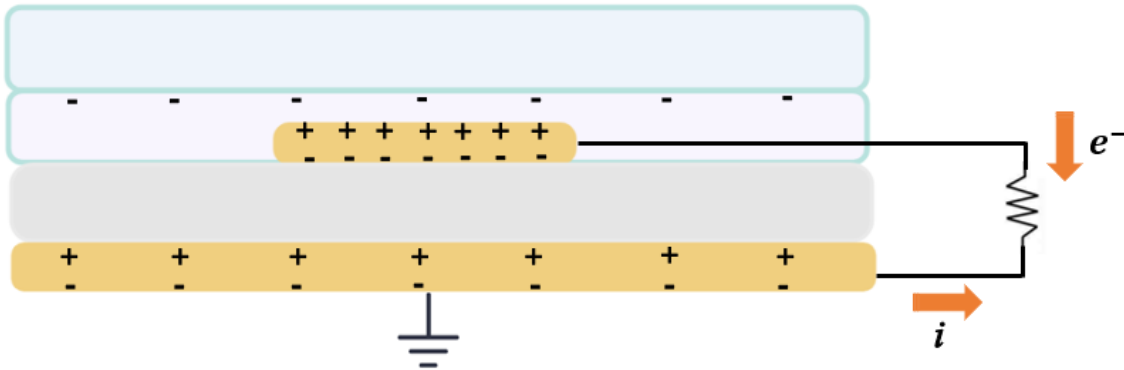
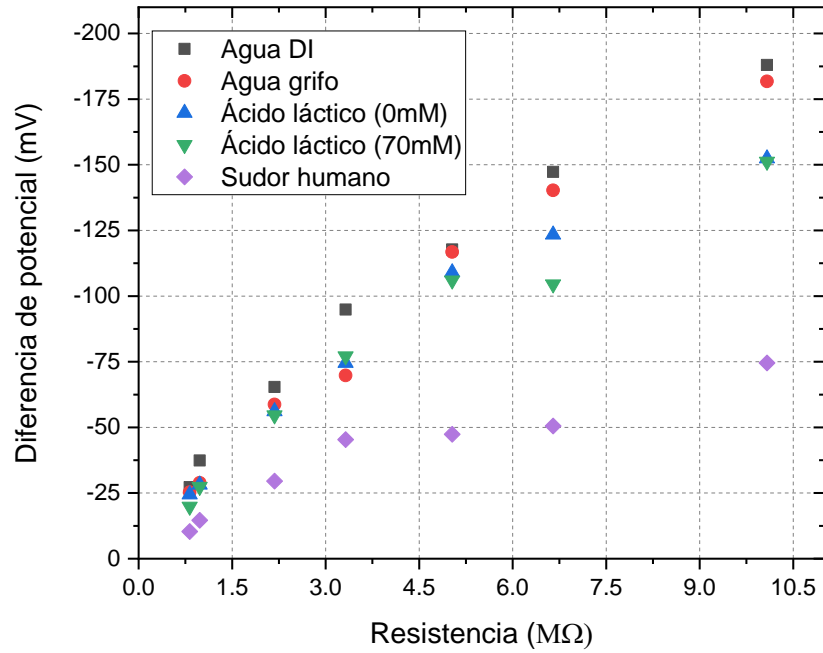


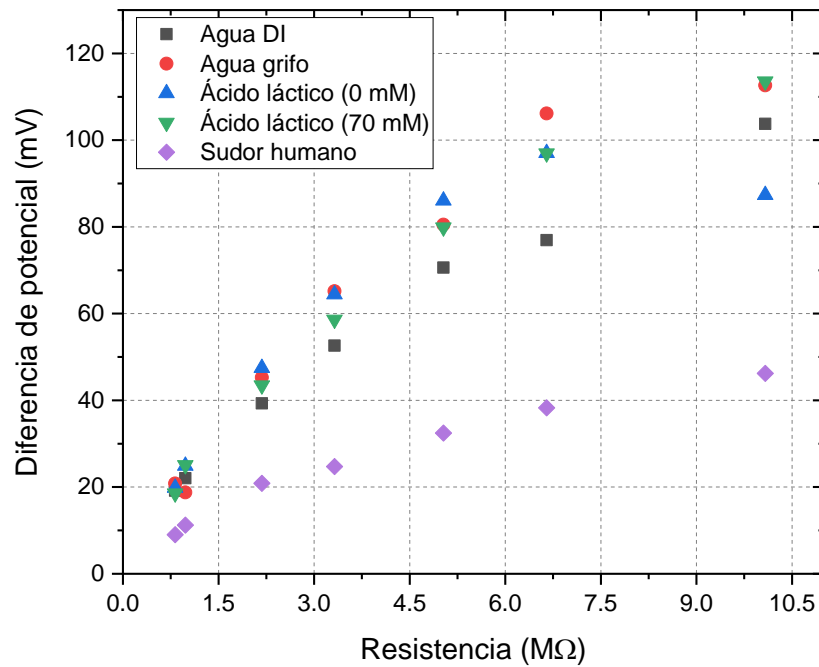
Figura 44.- Diagrama ilustrativo de la diferencia de potencial en el nanogenerador bajo carga, propuesto para los picos positivos.

Para las pruebas del prototipo *TENG* bajo carga se incluyó el uso de resistencias de diversos valores con el objetivo de analizar el comportamiento eléctrico del dispositivo. Las resistencias de algunos cientos de ohms no permitieron una obtención de señal, por lo que se optó para estas pruebas el uso de resistencia comerciales de 0.82, 98, 2.18, 3.32, 5.03, 6.65 y 10.08  $M\Omega$  (valores medidos por medio de un sistema fuente-medidor de la marca Keithley modelo 2400) a la velocidad de 13.5 mL/min. La tendencia para todas las soluciones es un aumento en la diferencia de potencial conforme aumenta el valor de la resistencia, acercándose cada vez más al potencial generado en condiciones de circuito abierto. En la Figura 45 se observa que los resultados presentan una tendencia similar tanto para la diferencia de potencial negativa (a), como para la diferencia de potencial positiva (b).

En este caso se omitieron las pruebas con las soluciones de sudor simulado con concentraciones de ácido láctico de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mM debido a que los resultados no muestran una diferencia visiblemente significativa; entonces, se analizaron los resultados con una concentración mínima de 0 mM y una máxima de 70 mM, así como con agua DI como blanco, agua de grifo y sudor de origen humano.



a)

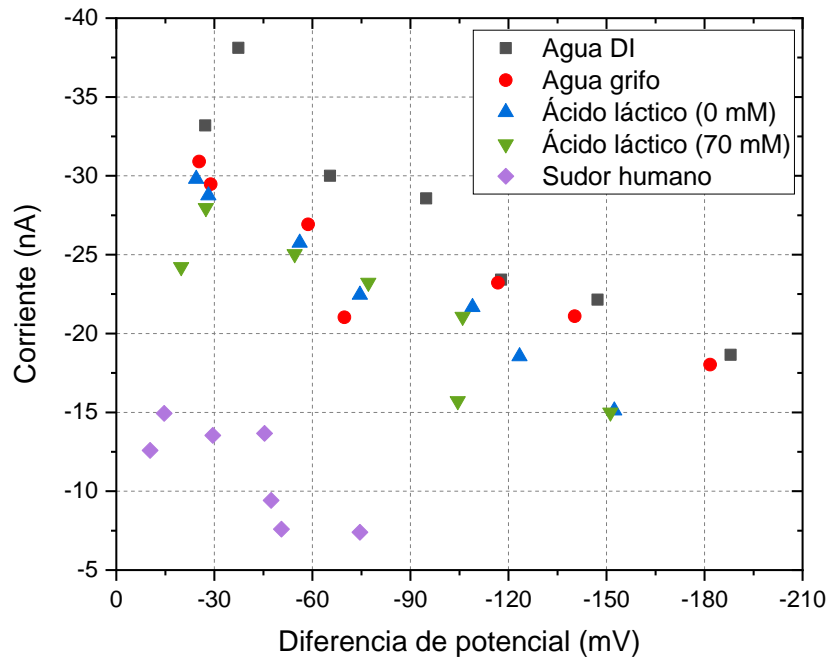


b)

Figura 45.- Gráficos de la diferencia de potencial generada contra la resistencia de carga para diferentes soluciones: a) para una diferencia de potencial negativo y b) para una diferencia de potencial positivo.

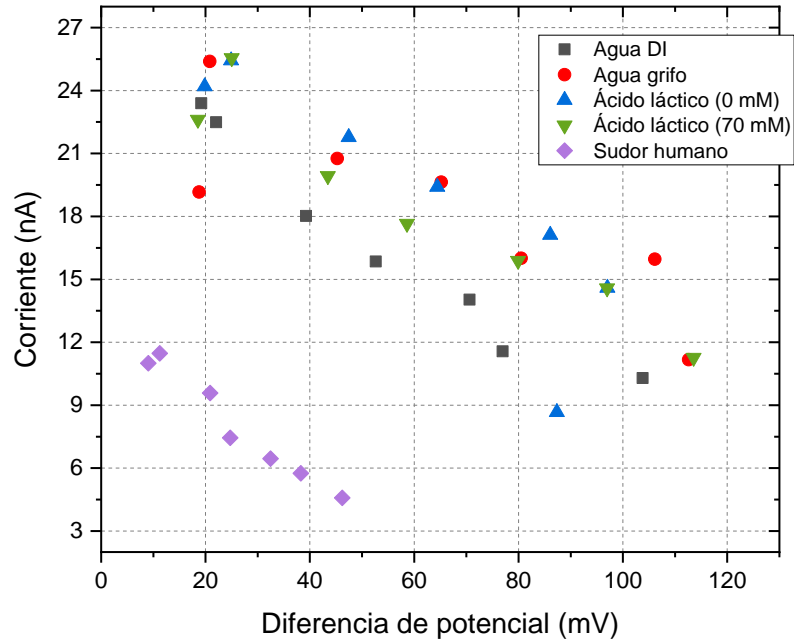
Con los resultados obtenidos de las pruebas del prototipo *TENG* bajo carga, se sustituyen los datos en la fórmula de la Ley de Ohm para calcular la corriente que se genera con el dispositivo diseñado (teniendo en cuenta la resistencia medida de cada carga). En la Figura 46 se muestran las gráficas para una diferencia de potencial negativa (a) y positiva (b), las cuales revelan, como se esperaba, una corriente mayor cuando con resistencias de valor más bajo.

Para cada una de las soluciones, la tendencia en el comportamiento de la corriente contra la diferencia de potencial es la misma, se trata de un comportamiento inverso a los que se observaron anteriormente. De tal manera que, la corriente generada dependerá de los requerimientos energéticos de aquello que se le conecte, teniendo en cuenta que el rango de corriente no supera un valor de 50 nA. Sin embargo, se considera que al aumentar el área de contacto donde se da el efecto de triboelectrificación es posible aumentar la corriente generada.



a)





b)

Figura 46.- Gráficos de la corriente en función de la diferencia de potencial obtenida para carga (a) negativa y b) positiva en las mediciones del osciloscopio.

Una vez obtenidos de manera experimental los valores de la diferencia de potencial se aplican las ecuaciones de la Ley de Ohm para obtener los valores de resistencia. Al graficar el voltaje con respecto de la corriente se gráfica, se hace una linealización de los valores suponiendo que el modelo de la fuente está compuesto por elementos lineales como capacitores y resistencias, por lo tanto, el comportamiento de la gráfica será lineal. Utilizando las ecuaciones de potencia, los valores son reemplazados a partir de la ecuación de la pendiente que resulta de la linealización, siendo un valor de resistencia que se asocia a los electrodos de cobre. Partiendo de las ecuaciones de linealización también se toma el valor de la corriente resultante.

Por lo anterior, los cálculos de potencia ( $P=v*i^2$ ) entregan una función cuadrática que permite conocer el comportamiento de la potencia del dispositivo, y a su vez, estimar la máxima potencia alcanzado con cada solución por el nanogenerador. Los datos obtenidos de este procesamiento de datos, se presenta en la Tabla 2. Los resultados de la caracterización del prototipo *TENG* bajo condiciones de carga y soluciones de agua DI, sudor simulado con 0

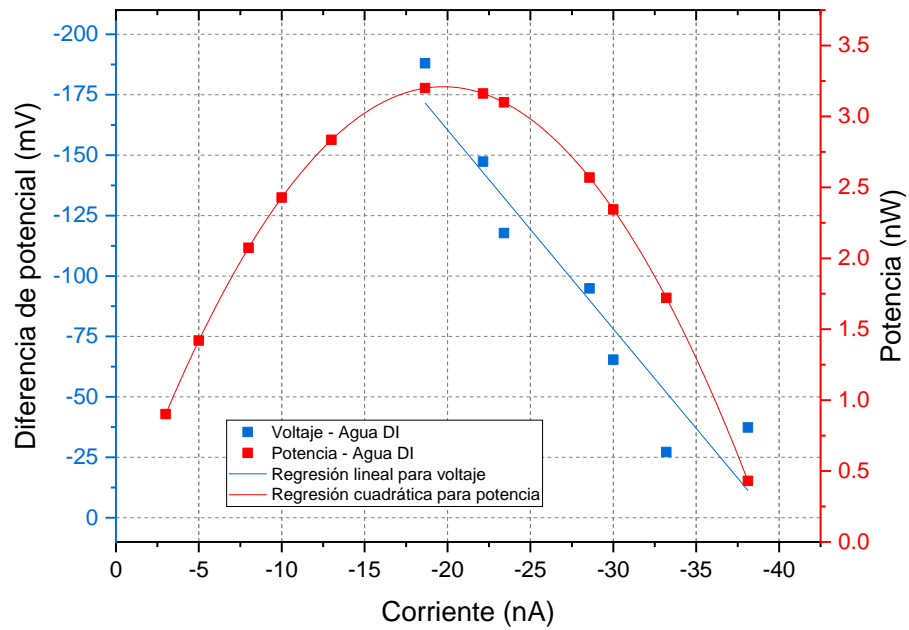


mM de concentración de ácido láctico, solución de sudor simulado con 70 mM de concentración de ácido láctico y sudor humano se muestran en las Figuras 47 – 50.

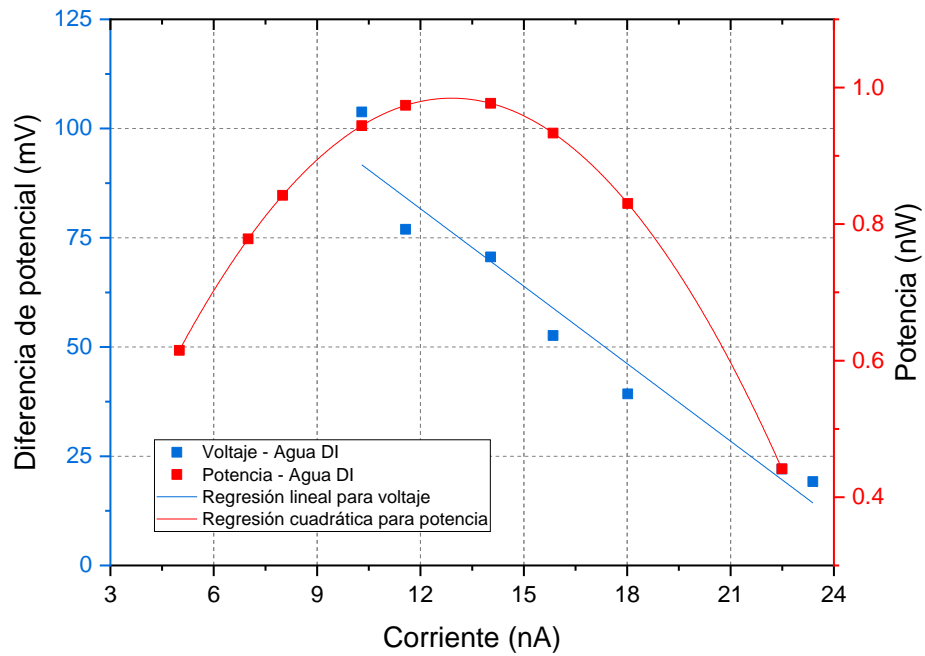
En la tabla 2, se pueden observar los valores de potencia máximos calculados para cada sustancia utilizada en las pruebas experimentales. Siendo la potencia generada por el agua desionizada el valor más alto de 3.209 nW, en comparación con las soluciones de sudor simulado de 2.033 nW y de sudor humano de 0.99 nW.

*Tabla 2.- Valores de potencia máxima generada con las diferentes soluciones de prueba, las columnas dos columnas de la izquierda corresponden a valores obtenidos con la desorción de iones H<sup>+</sup>, las columnas de la derecha corresponden a los valores en el proceso de adsorción de los iones.*

Solución	Potencia (nW)	Solución	Potencia (nW)
Agua DI	3.209	Agua DI	0.985
Sudor	0.99	Sudor	0.526
Ácido Láctico 0 mM	2.33	Ácido Láctico 0 mM	1.182
Ácido Láctico 70 mM	2.033	Ácido Láctico 70 mM	1.294

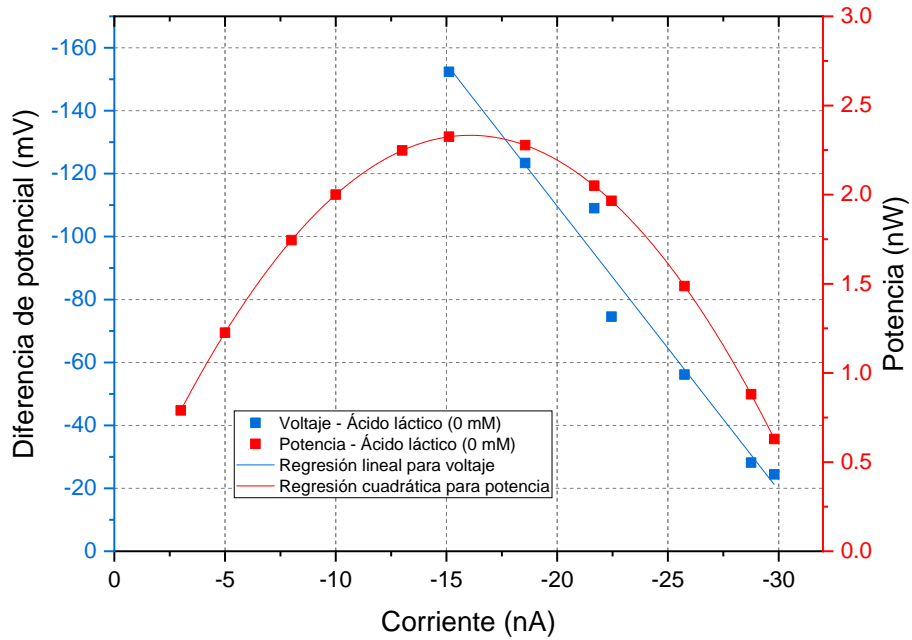


a)

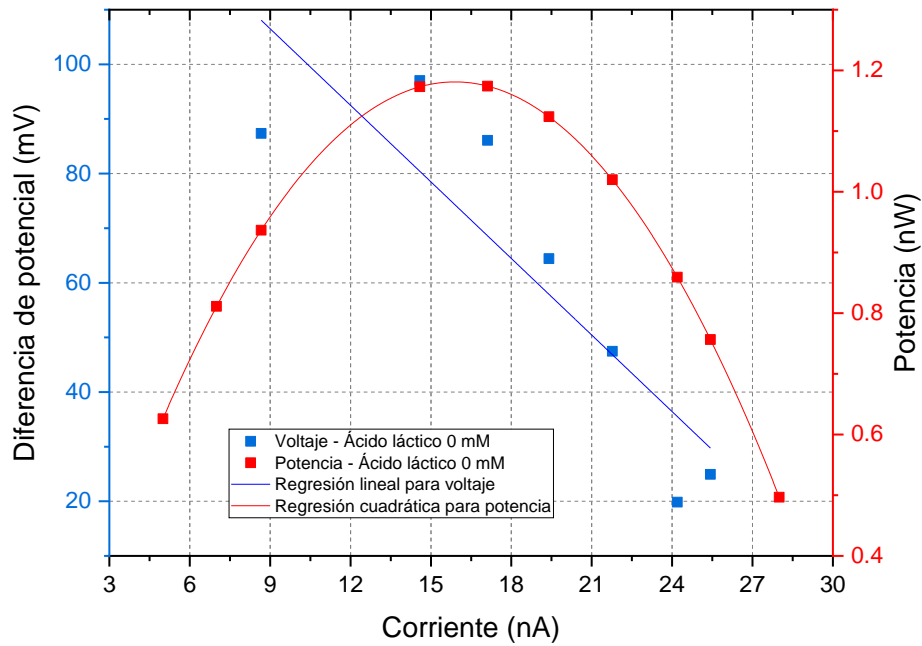


b)

Figura 47.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de agua DI en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva.

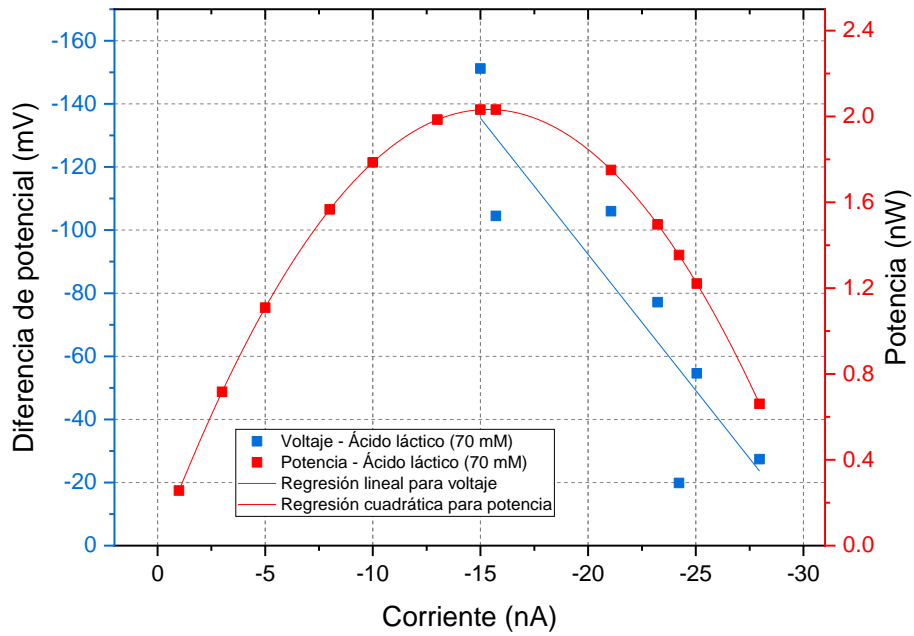


a)

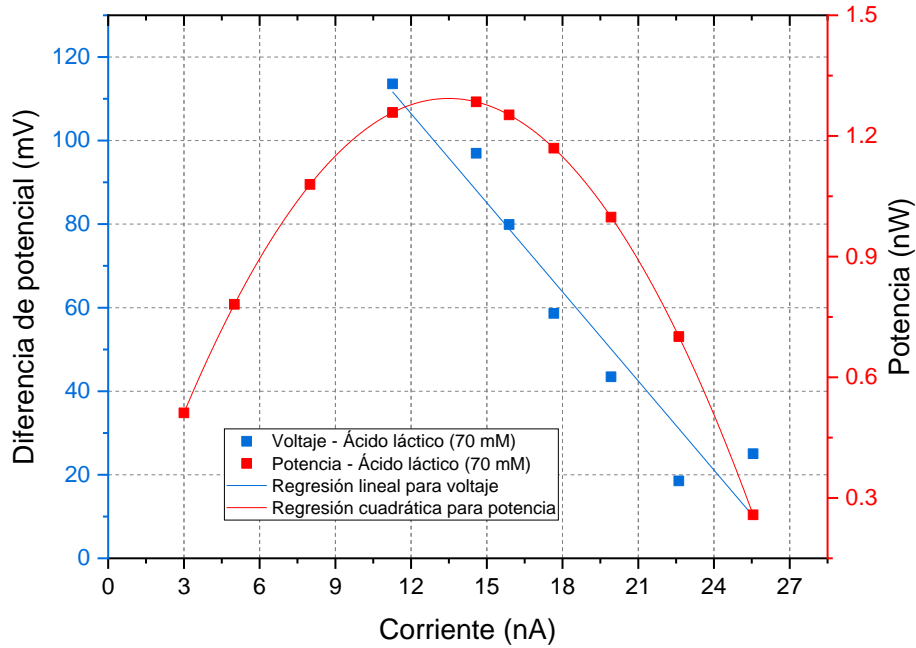


b)

Figura 48.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de solución de sudor simulado con una concentración 0 mM de ácido láctico en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva.

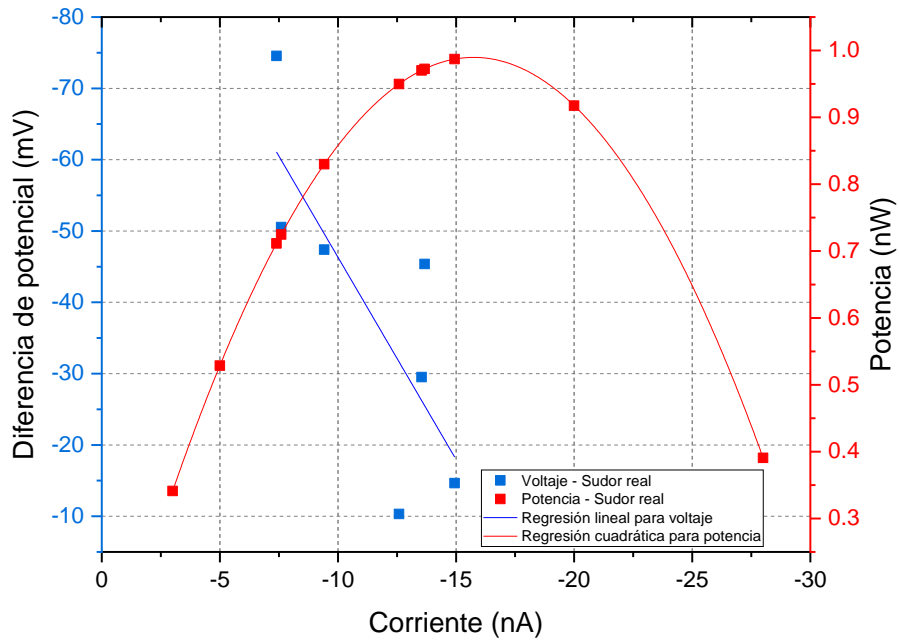


a)

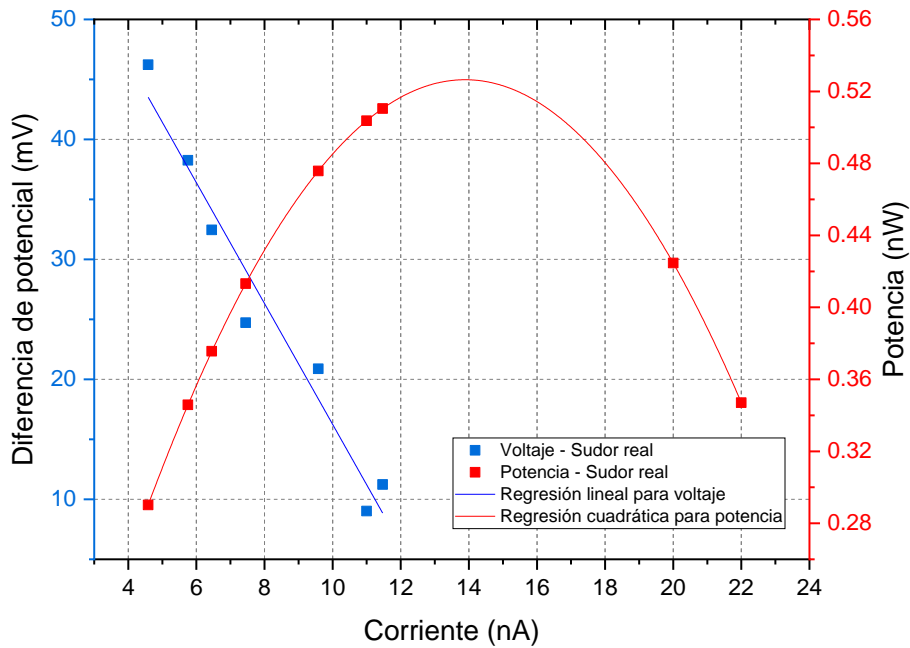


b)

Figura 49.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de solución de sudor simulado con una concentración 70 mM de ácido láctico en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva.



a)



b)

Figura 50.- Gráficos de linealización de los datos de la diferencia de potencial contra la corriente para un flujo de sudor humano en el microcanal, así como la curva de potencia calculada a partir de dicha linealización. a) Diferencia de potencial negativa y b) diferencia de potencial positiva.



## CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES

Las simulaciones en COMSOL Multiphysics® es una opción viable para el análisis de los fenómenos electrostáticos, para el diseño de los componentes del sistema, así como la densidad de carga que puede ser transferida de acuerdo con las propiedades de los materiales que conformen el dispositivo. Se puede determinar si la potencia generada será suficiente para la aplicación deseada.

Por su parte, el proceso de impresión 3D para los moldes para microcanales de PDMS resultó ser una técnica de bajo costo para la fabricación de moldes con una resolución de hasta 50  $\mu\text{m}$ , con respecto a las técnicas comúnmente utilizadas de fotolitografía, además de poder generar dispositivos a gran escala, en un menor tiempo.

En este sentido, un tratamiento de luz UV y térmico para los moldes de resina fotosensible son necesarios para eliminar las especies inhibitoras de la polimerización del PDMS, y poder obtener piezas de mejor calidad, sin daños a los microcanales durante la extracción y permita una adherencia completa a otra superficie y evitar fugas.

Con respecto a la unión de PDMS a PDMS mediante el equipo de limpieza por plasma para la fabricación de este dispositivo es una técnica que permite unir ambas superficies completamente, lo que permite inyectar en el canal un fluido con mayor presión sin afectar su estabilidad, aumentando la fricción entre el fluido y la superficie del PDMS.

Se determinó que los fenómenos involucrados en la triboelectrificación son tanto químicos como físicos, que dependen de diversos parámetros, como las propiedades de los materiales, la solución que fluye por el canal, la presión y velocidad del fluido, el pH de la solución y el área de contacto principalmente. El dispositivo nanogenerador es un prototipo capaz de generar una señal eléctrica a partir de la fricción entre el PDMS y se puede utilizar con soluciones diferentes como agua y sudor humano, además de la posibilidad de funcionar como un sistema sensor de especies en una solución. La máxima potencia se puede lograr utilizando agua desionizada (3.209 nW) mediante un proceso de adsorción de los iones  $\text{H}^+$  que se ha propuesto.





## REFERENCIAS

- [1] Z.-H. Lin, G. Cheng, L. Lin, S. Lee, and Z. L. Wang, “Water-Solid Surface Contact Electrification and its Use for Harvesting Liquid-Wave Energy,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 52, no. 48, pp. 12545–12549, Nov. 2013, doi: 10.1002/anie.201307249.
- [2] A. C. V. Mattar, C. Leone, J. C. Rodrigues, and F. V. Adde, “Sweat conductivity: An accurate diagnostic test for cystic fibrosis?,” *Journal of Cystic Fibrosis*, vol. 13, no. 5, pp. 528–533, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.jcf.2014.01.002.
- [3] A. Brueck *et al.*, “An artificial sweating system for sweat sensor testing applications,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 6, p. 606, May 2019, doi: 10.3390/electronics8060606.
- [4] X. Zhang, L. Chen, Y. Jiang, W. Lim, and S. Soh, “Rationalizing the Triboelectric Series of Polymers,” *Chemistry of Materials*, vol. 31, no. 5, pp. 1473–1478, Mar. 2019, doi: 10.1021/acs.chemmater.8b04526.
- [5] J. Sun *et al.*, “Sustainable and Biodegradable Wood Sponge Piezoelectric Nanogenerator for Sensing and Energy Harvesting Applications,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 11, pp. 14665–14674, Nov. 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c05493.
- [6] C. Chen *et al.*, “Direct Current Fabric Triboelectric Nanogenerator for Biomotion Energy Harvesting,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 4, pp. 4585–4594, Apr. 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c00138.
- [7] T. Patel *et al.*, “Self-Healable Reprocessable Triboelectric Nanogenerators Fabricated with Vitrimeric Poly(hindered Urea) Networks,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 9, pp. 11442–11451, Sep. 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c03819.
- [8] Q. Zhou, K. Lee, S. Deng, S. Seo, F. Xia, and T. Kim, “Portable triboelectric microfluidic system for self-powered sensors towards in-situ detection,” *Nano Energy*, vol. 85, p. 105980, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.105980.
- [9] X. Zhao and Z. Ounaies, “A facile method to enhance the flexibility and triboelectric output of PDMS using ionic liquid-coated single-wall carbon nanotubes,” *Nano Energy*, vol. 94, p. 106908, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106908.
- [10] Z. L. Wang, “From contact electrification to triboelectric nanogenerators,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 84, no. 9, p. 096502, Sep. 2021, doi: 10.1088/1361-6633/ac0a50.
- [11] R. B. Panicker, A. Kapoor, K. Deepa, and P. Sivaraman, “Triboelectric Nanogenerators,” in *Nanogenerators*, Boca Raton: CRC Press, 2022, pp. 121–130. doi: 10.1201/9781003187615-7.



- [12] C. Zhang and Z. L. Wang, “Triboelectric Nanogenerators,” Springer, Singapore, 2018, pp. 1335–1376. doi: 10.1007/978-981-10-5945-2\_38.
- [13] S. S. Kwak, H.-J. Yoon, and S.-W. Kim, “Textile-Based Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Wearable Electronics,” *Adv Funct Mater*, vol. 29, p. 1804533, Jan. 2019, doi: 10.1002/adfm.201804533.
- [14] J. Cottet and P. Renaud, “Introduction to microfluidics,” in *Drug Delivery Devices and Therapeutic Systems*, E. B. T.-D. D. D. and T. S. Chappel, Ed. Elsevier, 2021, pp. 3–17. doi: 10.1016/B978-0-12-819838-4.00014-6.
- [15] C. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography*. Wiley, 2007. doi: 10.1002/9780470723876.
- [16] B. W. Smith and K. Suzuki, *Microolithography*. Third edition. | Boca Raton : CRC Press, 2020.: CRC Press, 2020. doi: 10.1201/9781315117171.
- [17] G. M. Whitesides, E. Ostuni, S. Takayama, X. Jiang, and D. E. Ingber, “Soft Lithography in Biology and Biochemistry,” *Annu Rev Biomed Eng*, vol. 3, no. 1, pp. 335–373, Aug. 2001, doi: 10.1146/annurev.bioeng.3.1.335.
- [18] P. Bártolo, *Stereolithography*. Boston, MA: Springer US, 2011. doi: 10.1007/978-0-387-92904-0.
- [19] R. W. Pryor, *Multiphysics Modeling Using COMSOL®: A First Principles Approach*. Jones & Bartlett Learning, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.com.pr/books?id=NWeYVaDnmfcC>
- [20] “Software for Simulating Static and Low-Frequency Electromagnetics.” <https://www.comsol.com/acdc-module> (accessed May 23, 2022).
- [21] S. M. J. Mahmoudzadeh Akherat, M. A. Karimi, V. Alizadehyazdi, S. Asalzadeh, and M. Spenko, “A tunable dielectric to improve electrostatic adhesion in electrostatic/microstructured adhesives,” *J Electrostat*, vol. 97, pp. 58–70, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.ELSTAT.2018.12.001.
- [22] V. K. Mehta and R. Mehta, *S. Chand’s Principles Of Physics - XII*. S. Chand Publishing, 2018. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=UwQ5DAAAQBAJ>
- [23] COMSOL, *AC/DC Module User’s Guide*, 5.4. COMSOL Multiphysics, 2018. Accessed: May 24, 2022. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.acdc/ACDCModuleUsersGuide.pdf>
- [24] S. Hassanpour-Tamrin, A. Sanati-Nezhad, and A. Sen, “A simple and low-cost approach for irreversible bonding of polymethylmethacrylate and polydimethylsiloxane at room temperature for high-pressure hybrid microfluidics,” *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, p. 4821, Mar. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-83011-8.



- [25] B. Venzac *et al.*, “PDMS Curing Inhibition on 3D-Printed Molds: Why? Also, How to Avoid It?,” *Anal Chem*, vol. 93, no. 19, pp. 7180–7187, May 2021, doi: 10.1021/acs.analchem.0c04944.