

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE**  
**Departamento de Matemáticas y Física**

**Sustentabilidad y Tecnología**

**PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)**  
**Programa de Apoyo a la Investigación en Nanociencias y Nanotecnología I**



**ITESO**  
Universidad Jesuita  
de Guadalajara

**PAP4I03: Dispositivos médicos nanoestructurados**

Compósito piezoeléctrico adicionado con nanotubos de carbono para suministro  
de energía

**PRESENTAN**

Programas educativos y Estudiantes

Ing. en Nanotecnología. Martha Sofía Curiel Medina

Ing. en Nanotecnología. Carla Angélica Medina Ríos

Profesora PAP: Dra. Yenni Guadalupe Velázquez Galván

Tlaquepaque, Jalisco, diciembre de 2023

# ÍNDICE

## Contenido

REPORTE PAP .....	2
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional .....	2
Resumen .....	2
1. Introducción .....	3
1.1. Objetivos .....	3
1.2. Justificación.....	4
1.3 Antecedentes .....	5
1.4. Contexto.....	8
2. Desarrollo .....	10
2.1. Sustento teórico y metodológico .....	10
2.2. Planeación y seguimiento del proyecto .....	18
3. Resultados del trabajo profesional.....	31
4. Reflexiones del alumno o alumnos sobre sus aprendizajes, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto.....	45
5. Conclusiones .....	49
6. Bibliografía.....	50
Anexos (en caso de ser necesarios).....	55

# REPORTE PAP

## Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

*Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son una modalidad educativa del ITESO en la que el estudiante aplica sus saberes y competencias socio-profesionales para el desarrollo de un proyecto que plantea soluciones a problemas de entornos reales. Su espíritu está dirigido para que el estudiante ejerza su profesión mediante una perspectiva ética y socialmente responsable.*

*A través de las actividades realizadas en el PAP, se acreditan el servicio social y la opción terminal. Así, en este reporte se documentan las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo del proyecto, sus incidencias en el entorno, y las reflexiones y aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.*

## Resumen

En este proyecto se trabajó en la mejora del rendimiento de un compósito piezoeléctrico fabricado a partir de Sal de Rochelle y un elastómero, con el objetivo de aumentar la energía eléctrica que genera al ser estimulado mecánicamente. Además, para mejorar la conductividad eléctrica y con ello aumentar la señal, se realizaron pruebas con la adición de nanotubos de carbono (CNTs) mediante diferentes formas: en polvo, en membrana y dispersos en diclorometano (DCM).

Se realizaron diferentes caracterizaciones para el estudio de los compósitos, entre las que se encuentran la espectroscopía de fotoelectrones (XPS), difracción de rayos X (XRD), microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM), y montajes experimentales para medir la elasticidad y la señal eléctrica que produce cada compósito.

Se observó un aumento en la señal eléctrica generada por los compósitos adicionados con nanotubos, especialmente agregando la membrana funcionalizada y en polvo, puesto que

también fue evidente que el dispersante de los CNTs produce un efecto negativo en las propiedades del material, afectando la elasticidad y la respuesta eléctrica del mismo.

## 1. Introducción

### 1.1. Objetivos

General: Optimizar el rendimiento de un compósito piezoeléctrico fabricado a partir de sal de Rochelle en una matriz polimérica elástica, mediante la adición de nanotubos de carbono, buscando una mejora en sus propiedades mecánicas y eléctricas para una futura implementación en un sistema de suministro de energía a un dispositivo médico de baja potencia.

#### Específicos:

- Investigar en la bibliografía acerca de:
  - Compósitos poliméricos con propiedades piezoeléctricas.
  - Sensores piezoeléctricos y cosechadores de energía, así como sus técnicas de caracterización.
  - Propiedades de nanoestructuras conductoras como los nanotubos de carbono, incluyendo métodos de síntesis, funcionalización, dispersión y adición en compósitos.
- Estudiar y definir la metodología de fabricación del compósito piezoeléctrico con la que se obtengan resultados óptimos y reproducibles.
- Diseñar e implementar un montaje experimental para caracterización eléctrica.
- Diseñar e implementar un montaje experimental para medir las propiedades elásticas del material.
- Calcular los parámetros que describen las propiedades elásticas y eléctricas del compósito (módulo de Young, coeficiente piezoeléctrico y capacitancia).
- Estudiar métodos de adición de nanotubos de carbono al compósito piezoeléctrico

- Observar los efectos en la polimerización, cristalización de la Sal de Rochelle y respuesta eléctrica y elástica del material con la adición de nanotubos de carbono.
- Simulación y diseño de circuito de lectura electrónico para amplificación de señal eléctrica del compuesto piezoeléctrico y eliminación de ruido.
- Simulación y montaje de circuito medición de carga acumulada para caracterización eléctrica de la energía generada con el tiempo.

## 1.2. Justificación

Con el constante incremento en la demanda energética a nivel mundial y el cambio climático generado por el uso exagerado de combustibles fósiles, ha surgido una necesidad de nuevas tecnologías de captación y almacenamiento de energía, es por esta razón que en la actualidad se están explorando distintas fuentes renovables de energía. Dentro del uso de pequeños dispositivos inteligentes, que se utilizan para una gran variedad de aplicaciones distintas, se ha encontrado la necesidad de crear dispositivos autosustentables como parte de sistemas cosechadores de energía, los cuales consisten en convertir la energía presente en el medio ambiente en energía eléctrica utilizable. (Alvarado *et al.*, 2012) . Existen muchos proyectos en desarrollo que buscan cumplir estos objetivos, entre los que destacan los polímeros conductores, los compósitos de nanopartículas metálicas, entre otros (Rosa, 2014)

A pesar de que existen fuentes de energía renovable que se pueden utilizar para aplicaciones a mayor escala, el desarrollo de tecnologías de aprovechamiento de energía en escalas pequeñas brinda una alternativa al uso de baterías en sistemas electrónicos portátiles, aportando a reducir los efectos negativos en el medio ambiente y mejorando los tiempos de vida de este tipo de sistemas. (Aldape & Delgado, 2012).

Lo que se busca hacer en este proyecto es un sistema multifuncional tipo cosechador de energía, por lo que se pretende desarrollar un compuesto piezoeléctrico con sal de Rochelle basado en la transformación de energía mecánica o de movimiento en electricidad; esta

energía podrá ser capturada y almacenada para pequeños dispositivos autónomos inalámbricos.

Este proyecto busca implementarse en distintas áreas de aplicación como, por ejemplo, la recolección de energía por medio de la energía mecánica o vibracional. Es posible aprovechar los movimientos generados en el cuerpo humano (caminar, correr, movimientos en extremidades, latidos de corazón, entre otros) haciendo un sistema que pueda detectar este tipo de estímulos mecánicos, captarlos, transformarlos y almacenarlos para generar energía aprovechable, este tipo de movimiento generado por el humano, que es capaz de generar densidades de potencia de  $4 \mu\text{W}/\text{cm}^3$  (Alvarado *et al.*, 2012) puede ser aprovechado para dispositivos biomédicos de monitoreo, que requieren potencias menores a los  $100 \mu\text{W}$  (Rasouli & Phee, 2010). Para este tipo de aplicaciones, se debe de buscar que los materiales utilizados permitan tener un sistema ligero, flexible, biocompatible y resistente, destacando la importancia del uso de un elastómero, ya que este sería apto para ser utilizado como un cosechador de energía portable y ligero, alimentando dispositivos electrónicos que requieran de características como eficiencia de conversión de energía y acoplamiento a distintos medios.

### 1.3 Antecedentes

El desarrollo de los dispositivos electrónicos de nueva generación requiere de una innovación en cuanto a miniaturización y portabilidad. Debido a la reducción de los tamaños de estos dispositivos, la energía necesaria para abastecerlos es igualmente muy baja, haciendo posible su funcionamiento únicamente con la utilización de la energía limpia recolectada del entorno, tales como como la energía solar, térmica, mecánica, magnética, entre otras. (Wang, 2013).

Algunos de los dispositivos que pueden alimentarse con cosechadores de energía son sensores químicos y biomoleculares ultrasensibles, microelectrónicos, nanorobots, sensores ambientales móviles y remotos, electrónicos portátiles personales, etc., esto debido a que no necesitan de un gran consumo de energía para su funcionamiento, pues

funcionan a base de micro/nanosistemas (MNSs), que, a su vez, requieren de una cantidad mínima de potencia para su funcionamiento.

En los últimos años se han desarrollado diferentes proyectos para intentar crear sistemas de alimentación de energía para los nuevos dispositivos electrónicos, ayudar en el campo de la transformación de energía o para el desarrollo de nuevas tecnologías innovadoras multifuncionales, esto se busca aprovechando las propiedades de los materiales como por ejemplo su conductividad, resistencia, flexibilidad, piezoelectricidad, entre otras. Por lo que la nanotecnología está en busca de desarrollar materiales que tengan las propiedades y características óptimas para desarrollar más de una función a la vez conociendo y modificando las propiedades de los diferentes elementos. Wang & Wu (2012) presentan algunas de las tecnologías aplicadas en MNSs, entre una de ellas se encuentran los desarrollados a partir de materiales piezoeléctricos los cuales son capaces de convertir la energía proveniente de estímulos mecánicos o vibraciones a energía eléctrica, desde cientos de micro watts hasta algunos mili watts por centímetro cúbico.

Existen diferentes ejemplos de compósitos y polímeros que buscan producir o transformar energía a través de diferentes medios, como los polímeros piezoeléctricos los cuales pueden convertir un voltaje en energía mecánica y viceversa. Son ampliamente considerados en aplicaciones que involucran actuación electromecánica y detección mecano-eléctrica. Los polímeros piezoeléctricos consisten en materiales que experimentan un cambio de forma o dimensión cuando se exponen a un campo eléctrico. El régimen aplicado de voltaje, corriente, forma de onda, duración e intervalo entre pulsos del estímulo externo aplicado permite un control preciso de la transformación de energía eléctrica en mecánica (Rosler, 2012). Además existen polímeros conductores, los cuales están compuestos de matrices poliméricas aislantes cargadas con rellenos electro conductores, por ejemplo, grafeno, nanotubos de carbono y nanopartículas metálicas (Rahaman, 2017). También tenemos que hablar no solo de polímeros piezoeléctricos sino también de materiales que tengan esta propiedad y puedan ser aprovechados en este campo, por ejemplo, el titanato zirconato de plomo (PZT) que es un material cerámico de perovskita

que muestra un marcado efecto piezoeléctrico. Dentro de sus propiedades eléctricas esta la permitividad relativa del titanato de zirconato de plomo donde puede oscilar entre 300 y 20000 F/m, dependiendo de la orientación y el dopado. Al ser un material piroeléctrico, este material desarrolla una diferencia de voltaje en dos de sus caras bajo condiciones cambiantes de temperatura; en consecuencia, el PZT se puede utilizar como sensor de calor. También, es ferroeléctrico lo que significa que tiene una polarización eléctrica espontánea (dipolo eléctrico) que se puede invertir en presencia de un campo eléctrico. Además, exhibe una ruptura dieléctrica dependiente del tiempo: la ruptura puede ocurrir bajo tensión de voltaje constante después de minutos u horas, dependiendo del voltaje y la temperatura, por lo que su rigidez dieléctrica depende de la escala de tiempo en la que se mide. Por lo tanto, el PZT es uno de los materiales piezoeléctricos más utilizados para la recolección de energía mecánica (Cerdeiras Montero, 2016). Sin embargo, debido a algunos problemas sobre la toxicidad del plomo y la sustentabilidad a largo plazo, actualmente se están desarrollando materiales alternativos que solucionen estas deficiencias.

En la investigación y desarrollo de MNs piezoeléctricos existe un material de gran interés debido a su bajo costo, buenas propiedades mecánicas y piezoeléctricas, biocompatibilidad y su gran versatilidad de uso, este es la sal de Rochelle o tartrato de sodio y potasio ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) debido a que al momento de cristalizarse presenta una excelente respuesta piezoeléctrica, siendo un gran candidato para su funcionalización con algún otro material micro/nanoestructurado. A pesar de las grandes oportunidades de aplicación que otorgan las propiedades de la sal de Rochelle, actualmente es un material poco estudiado en cuanto a su funcionalización.

Una de las grandes ventajas y bondades de los polímeros son sus propiedades mecánicas y físicas como lo son la maleabilidad, no son corrosivos, son biodegradables, ligeros, aislantes de temperatura, etc., por lo que son una gran herramienta para integrar a otros sistemas más complejos que requieren de dichas propiedades. Existe una gran variedad de polímeros, pero los más utilizados para aplicaciones eléctricas y mecánicas son el Policarbonato (PC), Poliuretano (PU), Polisterineo (PS), Polidimetilsiloxano (PDMS) y Ecoflex. Por lo tanto, el tener estas propiedades en nuestro material nos proporciona la

ventaja de poder aplicarlo directamente en el cuerpo humano sin tener algún problema respecto a corrosión, rigidez y/o transmisor de calor, donde además al agruparlo con la sal de Rochelle permite que pueda obtener en conjunto propiedades piezoeléctricas. El elastómero Ecoflex por sí solo no tiene propiedades piezoeléctricas que puedan ayudar al desarrollo eléctrico, pero en conjunto con la sal permite el desarrollo de un compuesto con las propiedades mecánicas del elastómero y las propiedades piezoeléctricas de la sal.

Por otro lado, los nanotubos de carbono (CNT) son nanoestructuras muy prometedoras gracias a sus propiedades térmicas, eléctricas, ópticas y mecánicas. La adición de estos a otros materiales puede mejorar su conductividad eléctrica, produciendo nanocompuestos mejorados. En específico, los materiales poliméricos flexibles generalmente tienen baja conductividad eléctrica, lo que limita su aplicabilidad, pero se pueden utilizar varios métodos para mejorar su conductividad eléctrica mediante el uso de CNT con el fin de producir conductores estirables para dispositivos electrónicos portátiles multifuncionales (Abdulhameed *et al.*, 2021).

Existen muchos materiales, elementos o proyectos los cuales buscan aprovechar la propiedad de la piezoelectricidad para poder desarrollar una nueva tecnología de generación de energía para dispositivos de nueva generación, este proyecto busca seguir esa línea, desarrollar un sistema autosustentable y biodegradable el cual pueda ayudar a la producción de energía por medio del aprovechamiento de un estímulo mecánico, en este caso para dispositivos de baja energía, además de que este no solo produzca la energía necesaria, sino que también pueda realizar diferentes funciones dependiendo el campo en el que se quiera emplear.

#### 1.4. Contexto

Los últimos años han estado marcados por un fenómeno indiscutible, es el creciente ritmo al que evoluciona la tecnología. Esta velocidad imparables a la que los dispositivos que utilizamos mejora hacen que al poco tiempo de disponer de ellos tengamos que cambiarlos. A veces por simple capricho, otras por necesidad, ya que el avance imparables de tecnología hace que nuestros aparatos se queden obsoletos muy rápidamente, desechamos a diario

toneladas de productos electrónicos. Según un estudio del Instituto de Ecología elaborado en 2010, México genera trescientas mil toneladas de basura electrónica al año con una tasa de crecimiento del 6% anual (Rocha-Rangel, 2012).

En la actualidad, los dispositivos electrónicos inalámbricos son cada vez más utilizados, lo que implica un aumento en el uso de baterías o almacenadores de energía. Sin embargo, estas pueden llegar a ser contaminantes debido a las sustancias que utilizan para generar electricidad. De hecho, el PNUMA (Programa para el Medio Ambiente de las Naciones Unidas), calcula que se generan en todo el mundo cerca de 50 millones de toneladas de aparatos electrónicos que son desechados anualmente, lo cual nos hace ver que los nuevos desarrollos tecnológicos que se lleven a cabo deben tener como objetivo ser autosustentable para poder ser usado de forma más prolongada y aprovechar más el tiempo de vida de este. Los proyectos enfocados a la producción de energía para dispositivos de baja energía son tecnologías emergentes, ya que los nuevos dispositivos son pequeños y no requieren de grandes cantidades de energía y lo que se busca es suministrarlos por cosechadores de energía autosustentables y biodegradables.

En el ámbito del cuidado de la salud, existen dispositivos médicos portátiles que monitorean signos vitales, niveles de hormonas, etcétera... lo que permite la prevención, el tratamiento oportuno y seguimiento de la evolución de enfermedades. Por este motivo, hacer dichos dispositivos de manera que sean autosustentables en términos energéticos permitiría que tengan una vida útil más larga, reduciendo el costo a largo plazo para los usuarios.

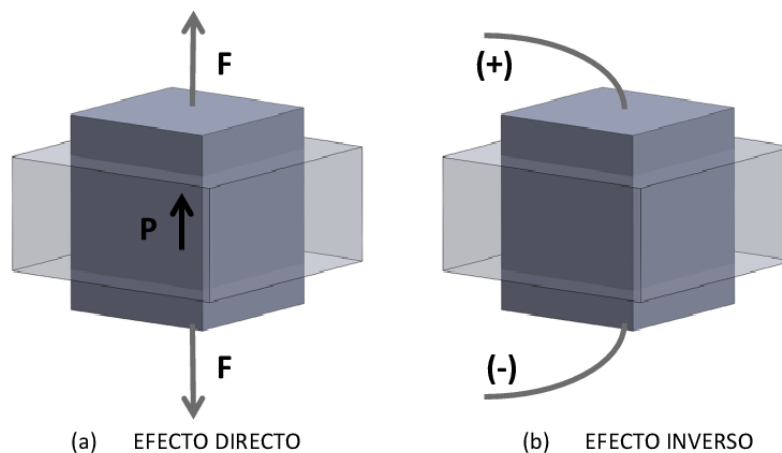
El presente proyecto tiene como propósito desarrollar un compuesto piezoeléctrico para la obtención de energía a partir del movimiento del cuerpo humano, por lo cual se comenzó por conocer las concentraciones adecuadas a utilizar del elastómero ECOFLEX y la sal de Rochelle, además de encontrar el mejor método de preparación que permitiera la polimerización adecuada para la eliminación de aire y la cristalización de la sal piezoeléctrica evitando la sedimentación de esta. Con el fin de aumentar y mejorar la señal producida por el compuesto, se implementó la adición de nanotubos de carbono, los cuales, gracias a sus excelentes propiedades de conducción, pueden ayudar a mejorar la conductividad en el material.

## 2. Desarrollo

### 2.1. Sustento teórico y metodológico

La principal función de un cosechador es capturar la energía del medio que lo rodea en lugar de obtenerla de un recurso externo, para después almacenarla y transformarla en electricidad que pueda alimentar a diversos dispositivos o aparatos electrónicos de baja energía. Este objetivo se logra a partir del uso de materiales con propiedades de transformación de energía, entre los que se encuentran los piezoeléctricos, los cuales capturan la energía vibracional o mecánica del entorno y la transforman en energía eléctrica (Aldape & Delgado, 2012).

Los materiales que tienen propiedades piezoeléctricas, entre los que se encuentra la Sal de Rochelle utilizada para este proyecto, generan un campo eléctrico al ser sometidos a una deformación. Esto sucede por la distribución de cargas en la estructura cristalina no centrosimétrica, que al ser deformada crea una diferencia de potencial, es decir, un voltaje (Ortega, 2016). También se puede obtener este efecto de forma inversa, aplicando un voltaje se genera una deformación (*Figura 1*).



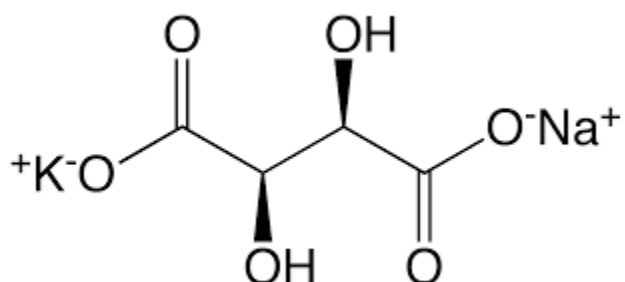
(a) EFECTO DIRECTO

(b) EFECTO INVERSO

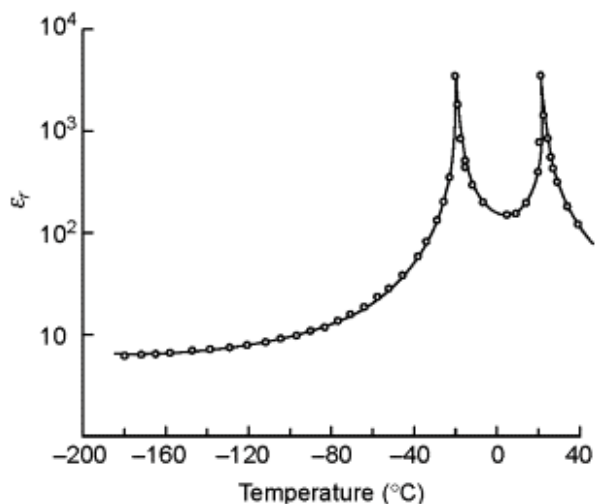
*Figura 1. Efecto piezoeléctrico (a) directo y (b) inverso. (Braña, 2016).*

Sin embargo, para que dicha sal pueda funcionar como piezoeléctrico, debe de ser sintetizada con estructura cristalina definida, bajo ciertas condiciones y parámetros. El

cristal de esta sal, con fórmula molecular  $C_4H_4KNaO_6 \cdot 4H_2O$  y la estructura química mostrada en la *Figura 2* presenta un rango de temperaturas delimitado por dos puntos de Curie de  $-18^\circ C$  (249K) y  $24^\circ C$  (291K) (*Figura 3*) donde puede comportarse como ferroeléctrico, lo que le permite mantener una polarización y posteriormente generar una diferencia de potencial. El cambio en la propiedad eléctrica del material proporcionado por la temperatura se debe a la estructura cristalina que presenta bajo dichos parámetros, la cual corresponde a la estructura polar monoclinica (Kao, 2004).



*Figura 2. Estructura Sal de Rochelle (Wikipedia, 2019)*



*Figura 3. Gráfico de la constante dieléctrica (k) de la sal de Rochelle en función de la temperatura (Kao, 2004).*

Para la síntesis de los cristales de Sal de Rochelle se deben estudiar primero ciertos parámetros como la temperatura de fusión de la sal que ronda entre los  $70^\circ C$ - $80^\circ C$  y su solubilidad en agua que es de  $73g/100g$  de  $H_2O$  a temperatura ambiente ( $24^\circ C$ ) (Mallinckrodt Baker, 2008), esto debido a que el proceso en general consta de disolver la

sal en agua para después dejar en reposo con el objetivo de lograr la cristalización. Variando parámetros como agitación y temperatura, la solubilidad de la sal puede cambiar, permitiendo que se logren concentraciones más altas en una solución hasta el punto de una sobresaturación. La temperatura y la concentración ideal para sintetizar cristales de la sal de Rochelle, es de 50°C a una concentración de 1060g/L (Osorio Vázquez, s. f.). Por consiguiente, las temperaturas de síntesis pueden influir en el comportamiento piezoeléctrico, con diferencias en cuanto a la energía eléctrica que generan.

Para la obtención de propiedades mecánicas más versátiles, los polímeros son una gran opción, ya que sus estructuras complejas que se conforman por la unión de moléculas más pequeñas conocidas como monómeros; que forman grandes cadenas lineales, ayudan a la obtención de propiedades como fácil maleabilidad, buena resistencia a la corrosión y resistentes a condiciones de esfuerzo. Los polímeros sintéticos provienen en su mayoría del petróleo y a diferencia de los naturales son elaborados por el hombre. Existe una gran diversidad de polímeros sintéticos como el nylon, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno, etc., y son usados ampliamente en toda la industria manufacturera como embalajes para alimenticios, fármacos, electrodomésticos, juguetes, utensilios, vehículos que hacen parte del amplio campo de aplicación que tienen.

No obstante, hay un subconjunto de polímeros que tienen cierta particularidad o propiedad mecánica; su alta elasticidad, los cuales son nombrados elastómeros. Los elastómeros están hechos de polímeros unidos por enlaces químicos con una estructura ligeramente reticulada; ahora bien, sin los enlaces cruzados, la tensión aplicada a un elastómero daría lugar a una deformación permanente, debido a ello el material se caracteriza por un alto alargamiento, flexibilidad y elasticidad, que ayuda a evitar que el material se agriete, se deforme o se rompa (Nogera, 2021).

En este proyecto se utiliza el elastómero Ecoflex por sus propiedades, ya que es un material de baja viscosidad, cuando endurece es ahulado, muy suave, resistente y elástico; puede estirarse hasta 10 veces más allá de sus dimensiones originales sin desgarrarse, y regresará a su forma original sin deformación, además de que el Ecoflex es un elastómero

biodegradable ya que este se descompone en menos de 60 días, en contraste con los 100 años que como media tarda en descomponerse el plástico habitualmente utilizado en la actualidad (Performance Polymers, s.f.).

Dado que este elastómero no posee propiedades conductoras, la adición de CNTs puede aumentar la conductividad del compuesto y por ende mejorar la respuesta eléctrica producida. Una técnica muy común para la síntesis de nanotubos es mediante deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés), donde se utilizan altas temperaturas alrededor de los 800°C y se requiere una atmósfera de gases inertes como el argón (Kalamaran *et al.*, 2000). Además, en este ambiente controlado ocurre un proceso de pirólisis que hace posible la alineación de los nanotubos en manojos o ramilletes, si se controlan ciertos factores como la magnetización. Por otro lado, también es posible modificar el diámetro de los nanotubos utilizando nanopartículas como semilla, entre las que pueden utilizarse las de hierro (Satishkumar *et al.*, 1999).

Se han producido haces de nanotubos alineados mediante pirólisis de ferroceno junto con metano, acetileno o butano. Se ha descubierto que las mezclas de ferroceno y acetileno son ideales para la producción de haces de nanotubos alineados compactos. Los haces de nanotubos están asociados con nanopartículas de hierro con diámetros en el rango de 2 a 13 nm.

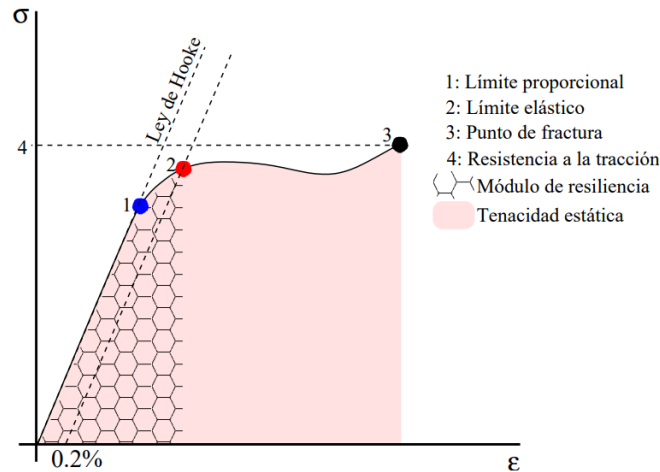
### Caracterización de las propiedades

Para definir algunas propiedades mecánicas del compuesto, se puede medir su elasticidad a través del módulo de Young, que relaciona el comportamiento elástico de un material con la fuerza que se le aplica y el aumento en la longitud de este. Este parámetro se puede calcular experimentalmente a partir de una gráfica de esfuerzo-deformación como la que se puede observar en la *Figura 4* (Ortiz & Cruz, 2022). El módulo de Young o de elasticidad es la pendiente de la recta en la zona elástica del diagrama, la cual está limitada por el límite elástico. Se puede expresar con la *Ecuación 1*, donde  $\sigma$  representa el esfuerzo ingenieril, que se obtiene a partir de la fuerza aplicada y el área de la sección transversal dónde se

aplica la fuerza y  $\epsilon$  representa la deformación longitudinal, que se obtiene a través del cociente entre la deformación y la longitud inicial. (Viñas & Mancini, 1998)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0}$$

*Ecuación 1. Módulo de Young*



*Figura 4. Diagrama esfuerzo-deformación generalizado (Viñas & Mancini, 1998)*

Para la caracterización óptica del compuesto se utilizó un microscopio óptico, el cual es un instrumento que permite observar en un tamaño aumentado elementos que son imperceptibles a simple vista. Su funcionamiento está basado en un conjunto de lentes y el uso de luz visible para aumentar la imagen de una muestra. Dentro del sistema óptico se incluye un foco (también denominado fuente de luz) que emite rayos de luz dirigidos hacia la muestra. Antes de llegar a la muestra los rayos atraviesan un condensador, cuya función es concentrar los rayos de luz sobre la preparación a observar. Habitualmente el condensador está acoplado con un diafragma para regular la cantidad de luz incidente. El siguiente elemento óptico es el objetivo, esta parte del microscopio consiste en un conjunto de lentes que reciben la luz proveniente de la muestra y permiten aumentar la imagen observada. Por último, el ocular amplía la imagen proveniente del objetivo y es a través de él que se puede observar finalmente la muestra (Mertz, 2019).

Para la caracterización de los compósitos adicionados con nanoestructuras, una de las técnicas más utilizadas es la microscopía electrónica de barrido (SEM). En estos equipos se utiliza un haz de electrones y se detectan las interacciones que tiene con la materia, de manera analógica a la luz en el microscopio óptico (Figura 5). El SEM permite observar la morfología de una muestra a escalas muy pequeñas, debido a que su resolución es mayor que la óptica. Existen distintos tipos de interacciones electrón-materia que se pueden detectar y brindar información importante sobre la muestra analizada (Figura 6), en el caso de los microscopios SEM se detectan principalmente dos tipos de electrones, los electrones retrodispersados (BSE por sus siglas en inglés) y los secundarios (SE por sus siglas en inglés). Haciendo uso de este mismo equipo, es posible determinar la composición química de un compuesto, detectando los rayos X característicos que se producen de la interacción con el haz de electrones, con una técnica denominada espectroscopía de energía dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) (Mohammed & Abdullah, 2018).

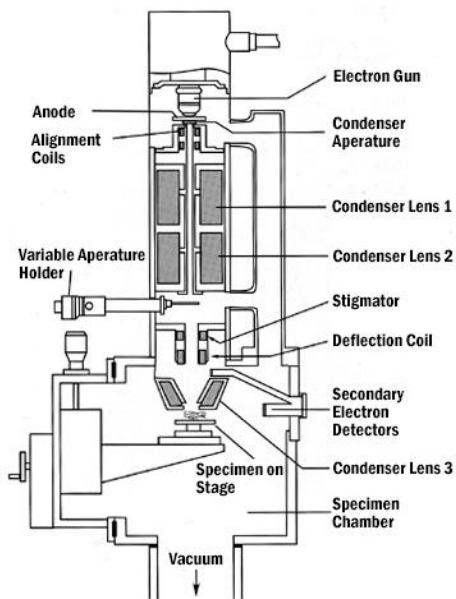


Figura 5. Composición de un SEM. (Duque, 2017)

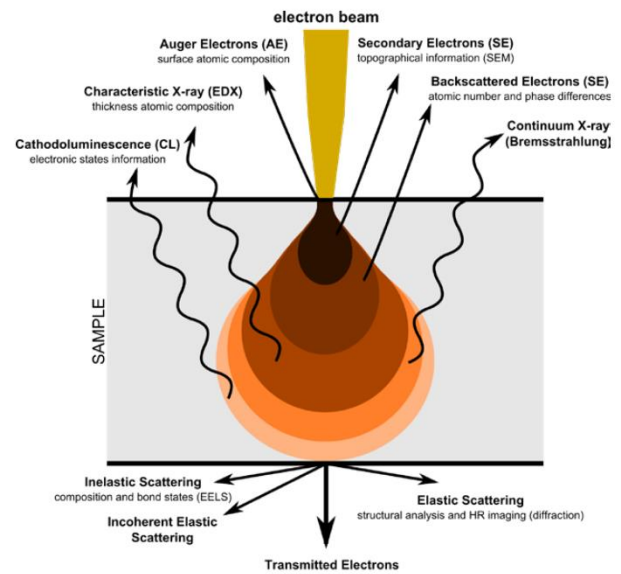


Figura 6 5. Volumen de interacción materia-electrón (Thermofisher, s.f.)

Para el análisis de la composición química de un material, una técnica muy utilizada en la investigación de polímeros para aplicaciones biomédicas es la espectroscopía

fotoelectrónica de rayos X (XPS por sus siglas en inglés), que realiza un análisis detallado de superficie a partir de un haz de rayos X que interacciona con la muestra. Esta técnica provee de información elemental analizando muestras de alrededor de 20 – 200 Å de profundidad en materiales sólidos, brindando información sobre los elementos y los enlaces químicos presentes (Andrade, 1985).

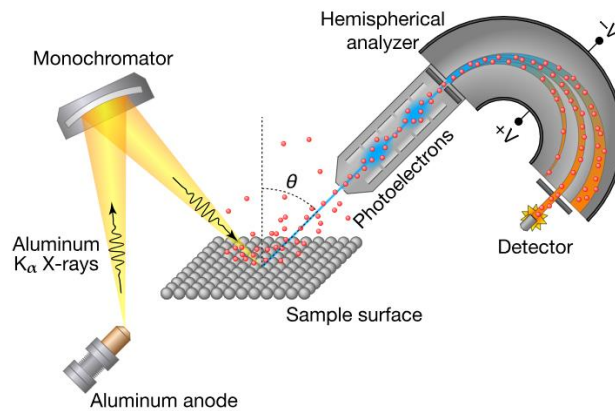


Figura 6. Funcionamiento de un XPS. (<https://grimmgroup.net/research/xps/background/>)

Para identificar la estructura cristalina de los materiales se puede emplear la espectroscopía por difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés). Detectando los rayos dispersados, mediante la ley de Bragg, se obtienen patrones de difracción con los que se pueden conocer las direcciones cristalinas presentes en la muestra (Figura 7) (Khan *et al.*, 2020). Esto será útil para identificar la dirección cristalina de la sal de Rochelle y poder relacionarlo con sus propiedades piezoeléctricas.

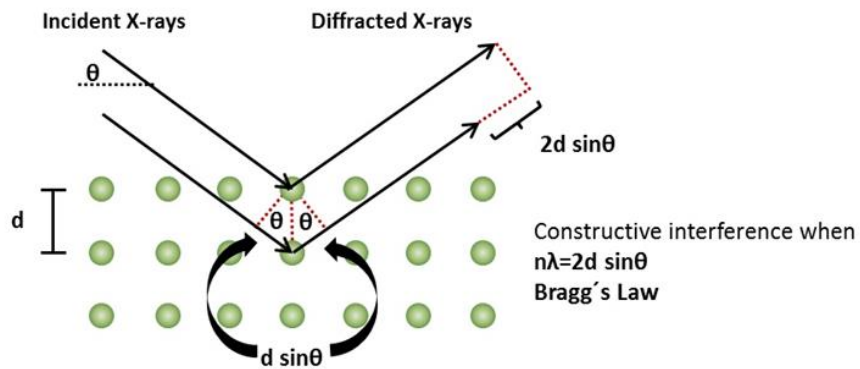


Figura 7.- Funcionamiento de un XRD. (X-ray diffraction (XRD) :: Anton Paar Wiki, s. f.)

En la literatura se reportan estudios de XRD para el Ecoflex, donde se observan picos anchos alrededor de 10 y 20° (Figura 8). También se tienen identificados los picos correspondientes a cada dirección cristalina de la sal de Rochelle, como se muestra en la Figura 9.

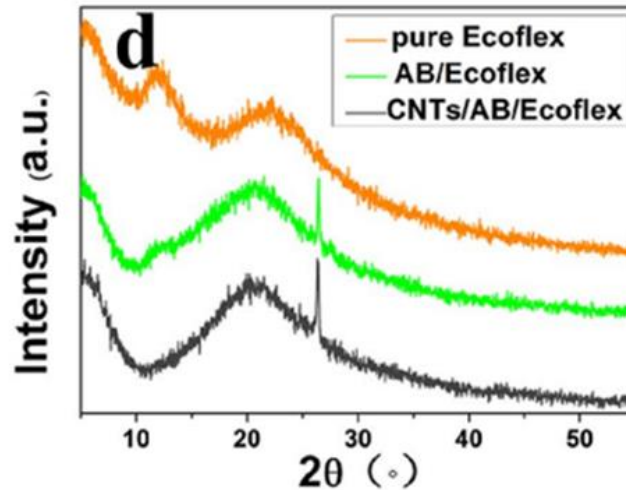


Figura 8. Espectro XRD para el ECOFLEX (curva naranja superior). (Zhang et al., 2020).

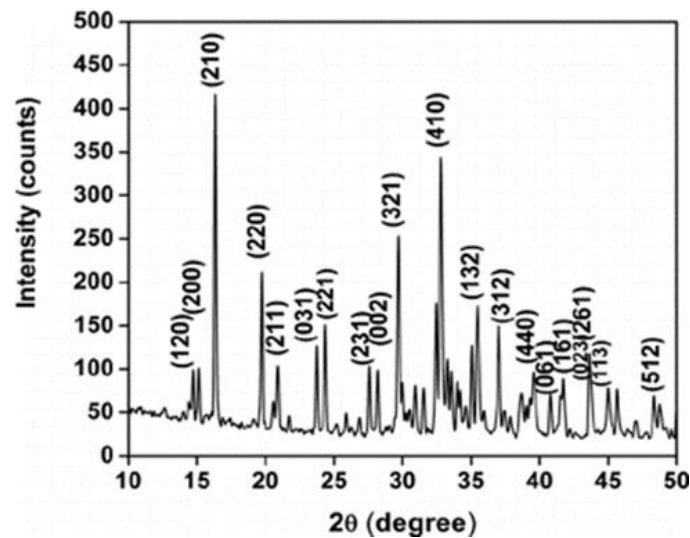


Figura 9. Picos correspondientes a las direcciones cristalinas de la sal de Rochelle. (Shyju et al., 2012).

Para caracterizar eléctricamente al compuesto y cuantificar la señal eléctrica que se genera, se utilizará un circuito electrónico que funcione para filtrar el ruido ambiental y amplificar la señal eléctrica y así lograr tener mediciones más precisas. Para esta causa, se ha propuesto un circuito integrado en una tarjeta o PCB, mismo que tendrá amplificadores operacionales (OPAMP), resistores y capacitores, cada uno con diferente función pero que se complementan entre sí para obtener una mejor lectura de las señales eléctricas que

generará el compósito. Finalmente, para medir esta señal eléctrica amplificada se hará uso de un osciloscopio, el cual es un dispositivo capaz de medir magnitudes de señales eléctricas, de manera cuantitativa y/o en forma de ondas u oscilaciones mediante gráficos.

Como complemento de la caracterización del material, se utilizará un circuito de medición de carga acumulada. Debido a que la carga producida por un material piezoeléctrico es normalmente muy pequeña, es necesario amplificar la señal generada. Este circuito, conformado por amplificadores operacionales, resistores y capacitores brindará un voltaje de salida a partir del cual será posible encontrar la carga acumulada despejando a partir de la siguiente expresión:

$$V_{OUT} = \frac{1}{C_F} \int -I dt = -\frac{Q}{C_F} \quad \text{Ecuación 2. Carga acumulada (Kleim, 2018)}$$

Para realizar las mediciones, se utilizarán dos fuentes de voltaje conectadas al amplificador OPAMP y un osciloscopio para medir la señal de salida a partir del voltaje de entrada generado por el piezoeléctrico.

## 2.2. Planeación y seguimiento del proyecto

- Descripción del proyecto

El presente proyecto consiste en la fabricación de un compósito piezoeléctrico a base de Sal de Rochelle y el elastómero Ecoflex adicionado con nanoestructuras para el suministro de energía a dispositivos de baja potencia. El planteamiento del proyecto busca que el compósito sea capaz de generar respuestas mecánicas y eléctricas estables y suficientes para su uso como cosechador de energía en dispositivos médicos autosustentables.

Para lograr los resultados esperados, se implementarán distintas metodologías de trabajo. Primeramente, realizará una investigación del estado del arte para comprender el efecto de los parámetros de fabricación del compósito en su respuesta como material piezoeléctrico, al igual que un estudio del efecto de la metodología de cristalización de la Sal de Rochelle en su comportamiento para la

optimización de resultados y estandarización de la metodología de fabricación. A partir de estos factores, se desea encontrar una metodología sencilla y reproducible para su posible futura aplicación industrial.

A través de la adición de los nanotubos de carbono se busca mejorar la conductividad del material, aumentar la señal y mejorar la estabilidad de la respuesta eléctrica del compósito, se estudiarán distintos métodos de adición de estas estructuras, principalmente utilizando los MWCNTs funcionalizados y dispersos en un solvente, en polvo y en una membrana funcionalizada. Adicionalmente, se diseñará e implementará un circuito de lectura eléctrico con el objetivo de amplificación de la señal eléctrica y la filtración de ruido en mediciones eléctricas, y también se complementará con un circuito de medición de carga acumulada.

Por otro lado, también se estudiará la composición, microestructura y las propiedades mecánicas del material, utilizando diferentes técnicas de caracterización como la microscopía óptica y SEM, espectroscopía XPS, XRD y un montaje experimental para medir la elasticidad.

- [Plan de trabajo](#)

En la *Tabla 1* se presenta de manera resumida el cronograma de trabajo del proyecto, mismo que estuvo sujeto a cambios y ajustes durante el desarrollo de las actividades. En adición al trabajo de investigación y de laboratorio, se tuvieron reuniones semanales junto con la profesora PAP para contar con una evaluación continua del trabajo realizado.

*Tabla 1. Plan de trabajo*

<b>Semana en calendario escolar</b>	<b>Actividades realizadas/planteadas</b>
1	Investigación bibliográfica.
2	Síntesis nanopartículas de plata.
3	Estudio de parámetros de fabricación en compósitos

4	Estudio de la cristalización de la Sal de Rochelle en un compuesto sobresaturado.
5	Análisis de polimerización de elastómero con solventes orgánicos para adición de nanotubos de carbono dispersados.
6	Control y simulación de circuito de lectura para eliminación de ruido y amplificación de señal eléctrica.
7	Montaje experimental para mediciones de resistencia mecánica de compósitos. Caracterización elástica de compósitos.
8	Planteamiento e implementación de circuito de medición de energía acumulada generada por los materiales piezoeléctricos
9	Adición de nanotubos de carbono a compósitos con variación en parámetros de fabricación.
10	Caracterización eléctrica y mecánica de compósitos con nanotubos de carbono
.11	Análisis de resultados y estandarización de metodología de adición de nanotubos de carbono.
12	Estudio del efecto de la frecuencia, amplitud y fuerza en respuesta eléctrica de los compósitos
13	Estandarización de metodología de cristalización de Sal de Rochelle a base de caracterizaciones con rayos X.
14	Mediciones finales de propiedades eléctricas y mecánicas de los compósitos.
15	Análisis de resultados y trabajo en reporte y presentación final.
16	Entrega de reporte PAP y presentación final.

- Desarrollo de propuesta de mejora

### Compósito piezoeléctrico

La metodología de fabricación del compuesto se realizó de manera similar a la que se trabajó en semestres anteriores, como se muestra en el diagrama de la *Figura 10*, se comenzó por añadir Sal de Rochelle en bruto en proporción 1:1 al elastómero ECOFLEX 00-33AF en moldes de plástico de 4.5 x 4.5 cm y, de manera manual con un agitador de vidrio, se mezcló hasta obtener una solución homogénea y uniformemente distribuida. Se continuó por introducir el compuesto al baño ultrasónico bajo distintos valores de temperatura, frecuencia, potencia y tiempo en baño, estos valores se han estudiado y se han variado buscando encontrar mejores respuestas eléctricas del compuesto. De manera general, se utilizan las condiciones mostradas en la *Tabla 2*.



*Figura 10. Diagrama de metodología de fabricación de compuesto piezoeléctrico*

*Tabla 2. Condiciones de baño ultrasónico para fabricación de compósitos 1:1*

<b>Condiciones baño ultrasónico</b>	
Potencia	80 %
Frecuencia	80 kHz
Temperatura	25 – 45 °C
Tiempo	20 min

### Cristalización de Sal de Rochelle

Se exploraron distintas metodologías de cristalización de la Sal de Rochelle con el objetivo de optimizar los resultados de las caracterizaciones eléctricas del material

al igual que estandarizar la metodología de cristalización de esta. A continuación, se presentan los métodos de cristalización utilizados.

1. Se fabricaron compósitos sobresaturados de Sal de Rochelle para el estudio de su crecimiento cristalino con rayos X. Para su fabricación, se siguió la metodología presentada en la *Figura 10* con una relación de 1:1.5 entre el elastómero ECOFLEX y la Sal de Rochelle, respectivamente. Para tener una comparativa entre los efectos de la temperatura en baño ultrasónico en el crecimiento de las estructuras cristalinas de la sal, se realizaron dos muestras, una con temperatura ascendente (25 - 45 °C), y una con temperatura constante ( $34 \pm 3$  °C).
2. Se cristalizó la Sal de Rochelle previo a la adición al compósito sobresaturando 10 g de la sal en 5 mL de agua destilada bajo agitación magnética a una temperatura constante de 40 °C. Después, se continuó por dejar reposar la solución sobresaturada hasta que se secan los cristales obtenidos.

### Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono de capa múltiple (MWCNTs por sus siglas en inglés) utilizados en el proyecto fueron brindados por la universidad IBERO CDMX como trabajo colaborativo. Fueron sintetizados por pirólisis de ferroceno en equipo especializado, utilizando la técnica descrita anteriormente, a cargo del Dr. Felipe Cervantes Sodi, con la colaboración de los estudiantes de Ing. Física Carolina Hernández Tinoco y Cesar Jarem Nabor Pacheco.

Los nanotubos obtenidos están aglomerados en manojos, por lo que se les aplicó una funcionalización con ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para hacer posible su dispersión (Yuliantoro *et al.*, 2021). Lo que se obtiene de este tratamiento se lava con agua y se filtra al vacío, obteniendo una membrana que posteriormente puede dispersarse en diferentes solventes, utilizando un homogeneizador

ultrasónico e intervalos de agitación. Se hizo una dispersión en DCM con una concentración de 0.9 mg/mL.

Compósito piezoeléctrico adicionado con nanoestructuras.

Como parte del planteamiento de la adición de MWCNTs al compósito dispersos en un solvente orgánico, se realizaron pruebas de polimerización del elastómero Ecoflex bajo distintas concentraciones de solventes para encontrar el solvente y la cantidad óptima del mismo. A partir de los resultados obtenidos en la *Tabla 3* se concluyó que el solvente óptimo sería el Diclorometano (DMF) y que 1 mL de solvente por cada 2 g de polímero serían los óptimos para obtener la máxima cantidad de nanoestructuras posibles sin que se pierda la polimerización del elastómero.

*Tabla 3. Resultados obtenidos de pruebas de polimerización de ECOFLEX con distintos solventes*

<b>Muestra</b>	<b>Solvente utilizado</b>	<b>Proporción en Compósito estándar 1:1 (2g ECOFLEX)</b>	<b>Estado de polimerización.</b>
1	DCM	0.4 mL DCM	Polimerización obtenida en 30 minutos.
2		1 MI DCM	Polimerización obtenida en 50 minutos.
3		2 mL DCM	No se obtiene en tiempo efectivo
4	Tolueno	0.4 mL Tolueno	Polimerización obtenida en 40 minutos
5		1 mL Tolueno	Polimerización obtenida en 60 minutos
6		2 mL Tolueno	No se obtiene en tiempo efectivo
7	DMF	0.4 mL DMF	

8		1 mL DMF	No obtenido en tiempo efectivo, generación de burbujas en polímero
9		2 mL DMF	

Se realizaron pruebas de adición de los MWCNTs utilizando tres métodos de adición distintos y con distintas concentraciones de nanotubos. Se agregaron los MWCNTs junto con la Sal de Rochelle en los moldes con Ecoflex para después ser mezclados manualmente e insertados en el baño ultrasónico; se utilizaron nanotubos funcionalizados dispersados en DCM (concentración de 0.9 mg/mL), nanotubos funcionalizados en membrana y nanotubos en polvo. *En la Tabla 4* se muestran los parámetros de fabricación y concentraciones de MWCNTs para cada muestra.

*Tabla 4. Parámetros pruebas de adición MWCNTs*

<b>Muestra</b>	<b>Método de adición MWCNTs</b>	<b>Cantidad agregada</b>	<b>Tiempo en baño ultrasónico [min]</b>
1	Dispersión en DCM (0.9 mg/ml)	0.25 ml	40
2		0.5 ml	40
3		0.6 ml	60
4		0.75 ml	60
5		1 ml	70
6		1 ml (secado previo a la adición)	80
7	Polvo	0.9 mg	20
8		5 mg	20
9		10 mg	20
10	Membrana	Cuadro	20
11		Línea gruesa (4.5 mm x 3.8 cm)	20

12		Línea delgada (2 mm x 3.8 cm)	20
----	--	-------------------------------	----

Caracterización morfológica: Microscopía óptica y Microscopía electrónica de barrido

La caracterización óptica se realizó haciendo uso de un microscopio LEICA DM 500 (Figura 11) con el objetivo de observar la cristalización y distribución de la sal dentro del compósito, el tamaño de cristal, observar irregularidades como la contención de oxígeno, poros dentro del compósito, la distribución no uniforme de tamaños de cristal y la distribución de las nanoestructuras agregadas.



*Figura 11. Microscopio óptico*

Para la caracterización con microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) se buscó estudiar la morfología y composición de los MWCNTs y de los compósitos fabricados. En adición, se utilizó el análisis de espectroscopía de energía dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) para encontrar la composición química de las muestras, buscando encontrar la pureza de los compósitos y/o posibles contaminaciones.



*Figura 12. Microscopio SEM*

### Caracterización XPS

Se realizaron análisis de espectroscopía XPS de la sal de Rochelle, el elastómero Ecoflex y del compósito con ambas partes con sobresaturación de sal. Se obtuvieron primero los espectros generales y luego se realizó un análisis de alta resolución para cada uno de los elementos presentes: C, O y Si en el caso del polímero; C, O, Na y K para la sal.

Primero se analizó una muestra de sal molida, pero se encontró un corrimiento en el pico del carbono al momento de hacer la calibración, por lo que se analizó posteriormente una muestra para la que se montaron los granos enteros de sal. En cuanto al análisis del elastómero no hubo problemas considerables.

Sin embargo, en cuanto al compósito, en las primeras mediciones no se pudo detectar ninguno de los elementos propios de la sal de Rochelle (Na y K), aún siendo un compósito sobresaturado de la misma, por lo que se procedió a montar una muestra más grande con un corte transversal que permitiera realizar un análisis en varios puntos y utilizar diferentes ángulos de incidencia del haz de rayos X, técnica que se conoce con el nombre de ARXPS. Dado que tampoco se encontró lo esperado, se hizo finalmente un análisis por decapado, donde se van desgastando las capas superiores del material con el objetivo de analizar más a profundidad.



*Figura 13. XPS del ITESO.*

### Caracterización elástica

Para obtener un análisis de las propiedades mecánicas de los compósitos fabricados y el efecto de la adición de la Sal de Rochelle y los MWCNTs en la elasticidad del elastómero, se planteó y montó un sistema con el cual se realizaron mediciones de la deformación de los compósitos a partir de una fuerza aplicada utilizando pesas, soportes, un sensor de fuerza y escuadras. El sistema montado se presenta en la *Figura 14*. A partir de los resultados obtenidos, se realizó el cálculo del módulo de Young y diagramas de Esfuerzo vs. Deformación para los compósitos.



*Figura 14. Sistema de mediciones elásticas*

### Caracterización eléctrica

Se planteó un montaje experimental (*Figura 15*) para la medición de la respuesta eléctrica del material. Utilizando electrodos fabricados con papel opalina recubiertos con pintura de plata y caimanes de punta plana se conectó el piezoeléctrico a un osciloscopio para encontrar el voltaje obtenido del piezoeléctrico en tiempo real bajo distintas frecuencias de golpeo generadas por un motor mecánico. En la *Tabla 5* se presenta la configuración del sistema del osciloscopio para las mediciones y en la *Tabla 6* se presentan los parámetros de medición utilizados.



*Figura 15. Montaje experimental caracterización eléctrica*

*Tabla 5. Configuración osciloscopio para caracterización eléctrica*

<b>Configuración parámetros osciloscopio</b>	
Modelo	DSO-X 2002A
Rango de medición	$y = \pm 20 \text{ mV}$
Retraso	50 mV/s
Adquisición de señal	Promedio
Tipo de medición	Máxima
Trigger	28 mV
Tipo de disparo	Flanco con inclinación ascendente

Tabla 6. Parámetros de medición caracterización eléctrica

Parámetro	Valores
Frecuencia de golpeo	20 – 50 Hz (saltos de 5 Hz)
Amplitud	6 mm

Como complemento en la medición eléctrica, se estuvo trabajando en el desarrollo de un circuito electrónico de lectura para la filtración del ruido y la amplificación de la señal eléctrica. Durante el semestre se trabajó a partir de los esquemáticos realizados por compañeros en semestres anteriores, se corroboraron valores de los componentes y se realizaron algunas modificaciones. Este circuito se va a imprimir en una tarjeta PCB durante el curso del siguiente semestre ya que no se contaba con todos los componentes electrónicos necesarios para fabricarlo este semestre. En la *Figura 16* se presenta el esquemático del circuito en el simulador TINA-TI junto con su simulación, en la que se obtiene un valor de salida de alrededor de 3V.

Se espera que en un futuro, se pueda incorporar este circuito en las mediciones eléctricas para lograr obtener resultados más precisos en la respuesta del material.

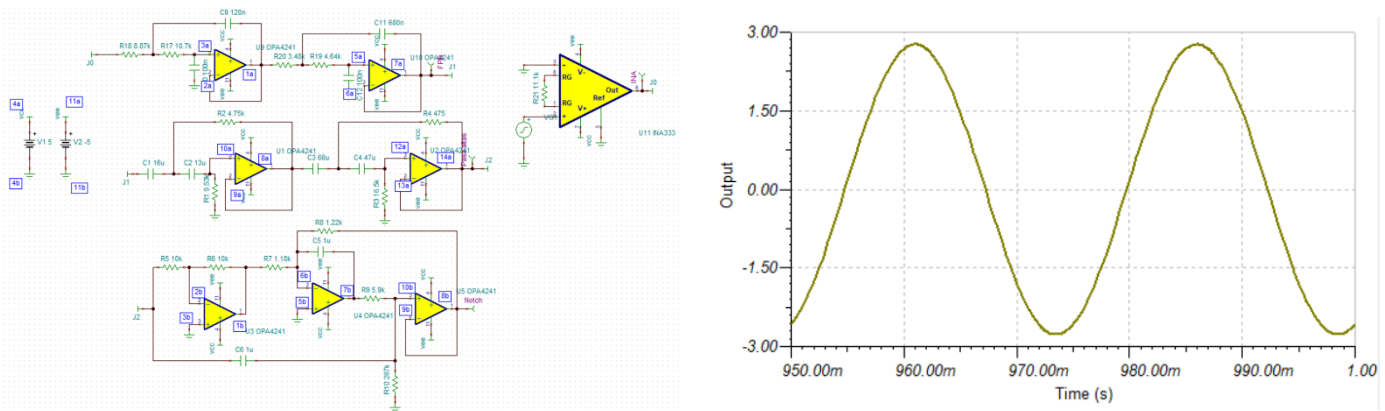


Figura 16. Esquemático y simulación de circuito de lectura

En adición a este sistema, se planteó también generar un circuito de medición de carga acumulada generada buscando complementar el estudio de la generación de energía de los compósitos. El circuito implementado (*Figura 17*) se basó en el diseño

presentado por Robert Kleim en su artículo “*Understanding and Implementing Charge Amplifiers for Piezoelectric Sensor Systems*”, se realizó el esquemático en el simulador TINA-TI (Figura 18) y se montó sobre una protoboard. Se realizaron pruebas y se encontró que el circuito era funcional, más sin embargo es necesario triplicar los componentes para poder amplificar la señal de entrada y obtener una lectura de voltaje de salida a partir del voltaje de entrada esperado generado por el material piezoeléctrico, que es de alrededor de 200 mV (Figura 19). El circuito final será implementado en el siguiente periodo del proyecto.

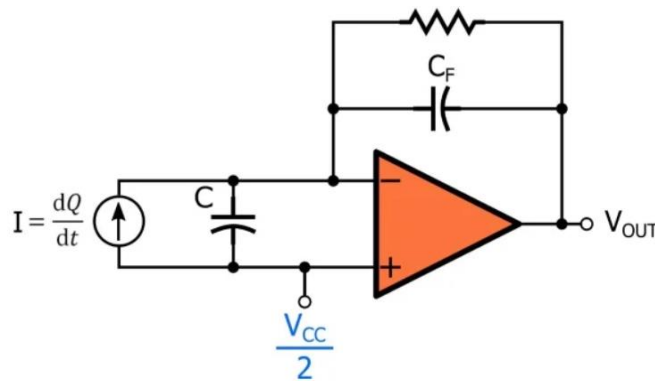


Figura 17 7. Circuito de amplificación de carga (Kleim, 2018)

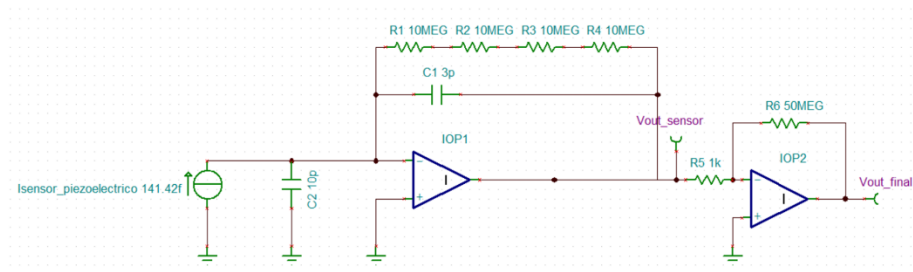


Figura 18 8. Esquemático circuito de medición de carga acumulada

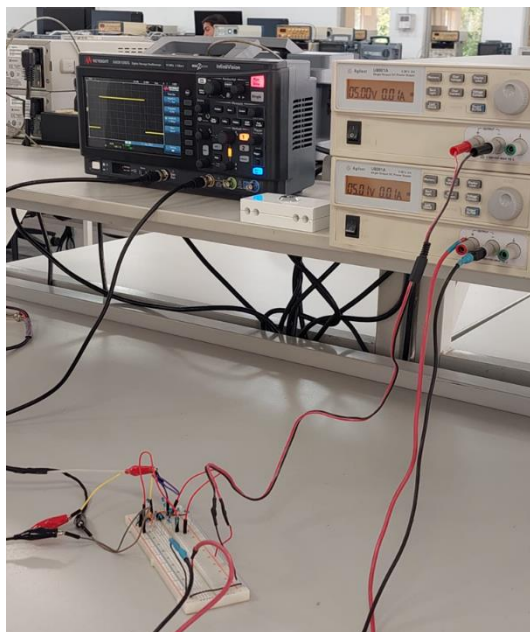


Figura 19 9. Pruebas circuito de medición de carga acumulada

### 3. Resultados del trabajo profesional

#### 3.1 Polimerización de compósitos para distintos métodos de adición de MWCNTs

En la *Tabla 7*, se muestran los resultados de polimerización para cada concentración de los tres métodos de adición de MWCNTs a los compósitos piezoeléctricos.

*Tabla 7. Resultados de polimerización de diferentes compósitos con CNTs.*

Muestra	Método de adición MWCNTs	Cantidad agregada	Estado de polimerización
D025	Dispersión en DCM (0.9 mg/ml)	0.25 ml	Polimerización uniforme obtenida
D05		0.5 ml	Polimerización obtenida en la mayor parte del compósito
D06		0.6 ml	No se obtuvo polimerización uniforme
D075		0.75 ml	No se obtuvo polimerización uniforme
D1		1 ml	No se obtuvo polimerización

D1s		1 ml (secado previo a la adición)	No se obtuvo polimerización uniforme
P09	Polvo	0.9 mg	Polimerización obtenida, distribución de nanotubos poco uniforme.
P5		5 mg	Polimerización obtenida, distribución de nanotubos poco uniforme.
P10		10 mg	Polimerización obtenida y saturación visual, grosor no uniforme debido al proceso de mezclado
Mc	Membrana	Cuadro	Polimerización obtenida, cuadrito de membrana inmerso y visible.
MI		Línea gruesa	Polimerización obtenida, línea de membrana inmersa y visible.
MI 2		Línea delgada	Polimerización obtenida, línea de membrana inmersa y visible

Se pudo observar que no todos los compósitos presentaron polimerizaciones rápidas o uniformes. Se encontró que, en el caso de los compósitos adicionados con MWCNTs en dispersión el límite máximo es de 0.5 ml para que se pueda polimerizar de manera uniforme ya que aquellos con mayor cantidad de dispersión no lograron una polimerización uniforme. También se observó que el realizar un proceso de secado de DCM en la dispersión previo a la adición de los componentes y la mezcla para la fabricación del compósito también presentó una polimerización no uniforme, a pesar de ya no contar con el solvente, existe la

posibilidad de que la funcionalización de los nanotubos esté afectando la polimerización de los compósitos, aunque no se tiene información concreta que pruebe esta relación.


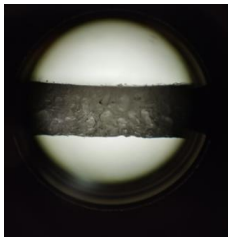

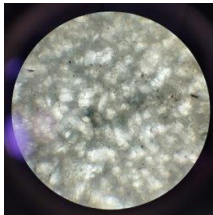
De manera similar, se encontró que el máximo en la adición de MWCNTs en polvo es de 10 mg debido a la saturación de estos, que complicó el proceso de mezclado del compósito.




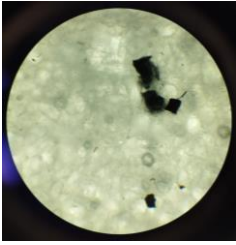



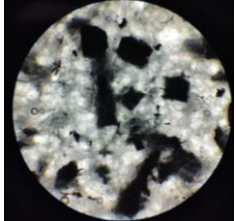
En cuanto a los compósitos adicionados con membranas de MWCNTs funcionalizados, no se observó ningún efecto de la misma en la polimerización de los compósitos, probando una ventaja para este método de adición ya que presenta mayor eficiencia en los tiempos de fabricación.




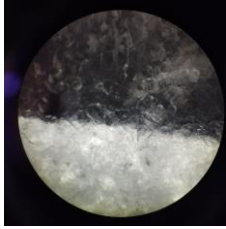

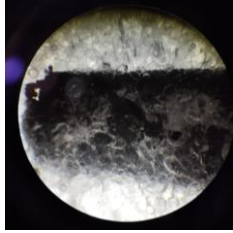
### 3.2 Caracterización morfológica

En las caracterizaciones mediante microscopía óptica es posible observar la cristalización de la sal y la dispersión de los CNTs agregados de diferentes formas, así como distribución a lo largo del volumen del compósito, en la *Tabla 8* se pueden observar los resultados para las muestras con distintos tipos de adición de MWCNTs.

*Tabla 8. Caracterizaciones visuales y mediante microscopio óptico de compósitos con CNTs.*

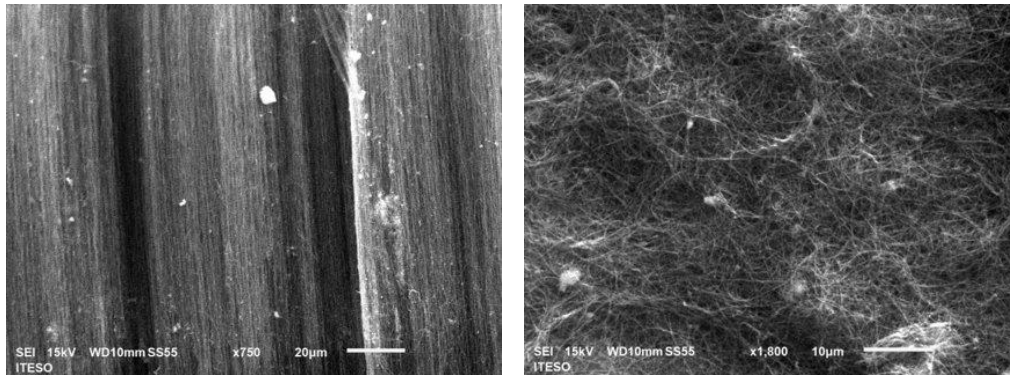
<b>Muestra</b>	<b>Foto</b>	<b>Imagen en microscopio óptico</b>
D025		
D05		

D1		
P09		
P5		
P10		

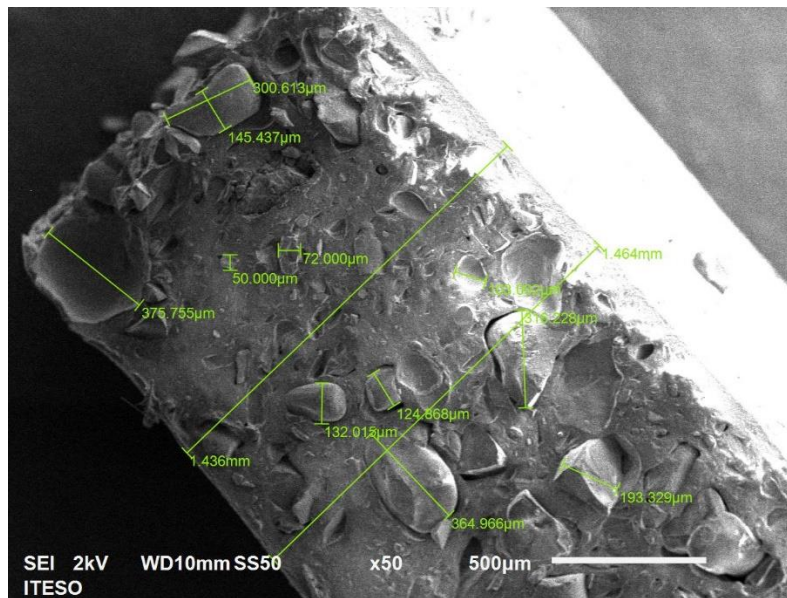
Mc		
MI		
MI2		

Como se puede observar en la *Tabla 8*, se presentó una distribución uniforme de nanotubos dentro de la matriz polimérica para las muestras D025, D05 y D1, las cuales se refieren a los compósitos adicionados con distintos volúmenes de CNTs en dispersión, este comportamiento era el esperado debido a que se utilizó un solvente para dispersar las nanoestructuras. En el caso de las muestras P09, P5 y P10, que se refieren a las muestras con MWCNTs agregados en polvo, se observó poca distribución de los nanotubos, presentando aglomeraciones de tamaños irregulares dentro del material. De manera visual, se pudo observar también la presencia de burbujas en todas las muestras, esto se puede deber al proceso de fabricación y mezclado de los compósitos.

En cuanto a la caracterización SEM, se realizaron análisis para las muestras de los nanotubos, donde se pudo observar la diferencia entre las estructuras aglomeradas y las que ya están funcionalizadas y dispersas, como se muestra en la *Figura 20*.



*Figura 20. Micrografía SEM de nanotubos de carbono aglomerados (izquierda) y funcionalizados y dispersos (derecha).*



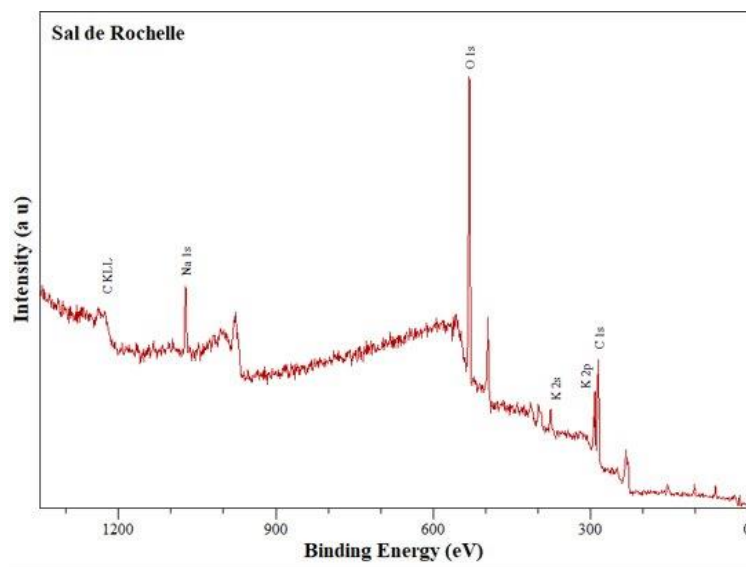
*Figura 21. Micrografía SEM compósito piezoeléctrico*

Acerca de los compósitos (*Figura 21*), se observó que la distribución de tamaño de los granos de la sal no es uniforme. Además de esto, no fue posible realizar un análisis más a profundidad ni calcular los porcentajes de composición química, dado el carácter no conductor de la muestra, que se cargaba eléctricamente durante los análisis, incluso ya con la adición de los CNTs.

### 3.3 Caracterización XPS

El análisis XPS para la muestra de la Sal de Rochelle (*Figura 22*) mostró una composición atómica de 28.6% Na 1s, 10.9% K 2p, 48.7% O y 11.8% C. Comparado con el valor teórico según la fórmula química de la sal  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , los porcentajes reales son 3.6% para K, Na, 35.7% O y 14.3% C. Se obtiene una gran diferencia en cuanto a los porcentajes de Na y K, pero los de O y C son similares. Esto puede deberse a fallos que se presentaron durante el proceso de calibración del pico de C, donde se presentó un corrimiento.

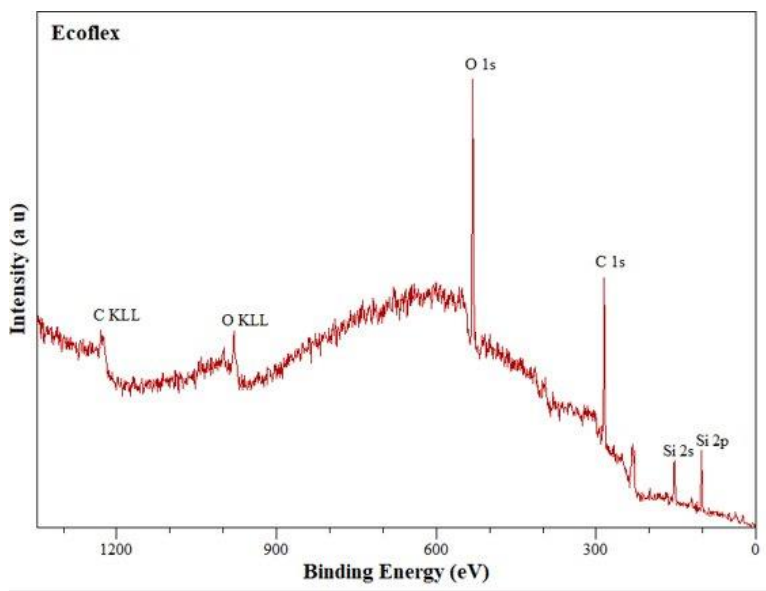
Dado que no se encuentra información en la literatura relativa al análisis de este material mediante XPS, no es posible comparar los picos para determinar su correspondencia con los enlaces químicos.



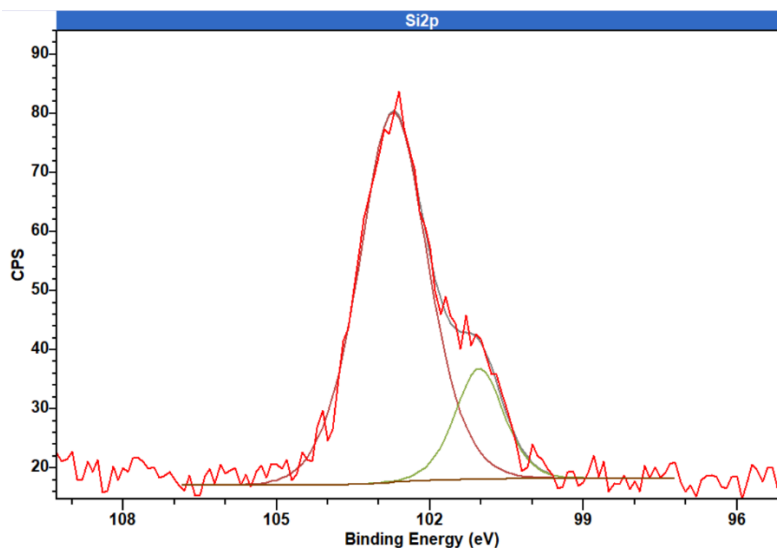
*Figura 22. Espectro XPS de Sal de Rochelle.*

En cuanto al análisis del Ecoflex (*Figura 23*), la composición medida fue de 9.0% Si 2p, 55.8% O y 35.2% C. Dado que no se conoce la composición real, estos valores no pueden ser comparados pero sí tienen sentido para otro tipo de polímeros similares a base de silicón.

En el pico de alta resolución del silicio (*Figura 24*), se presenta un corrimiento característico de los siloxanos, estructuras comúnmente presentes en estos materiales. (Para más información acerca del ajuste de los picos de alta resolución para los otros elementos, ir al *Anexo 1*)



*Figura 23. Espectro XPS del elastómero Ecoflex.*

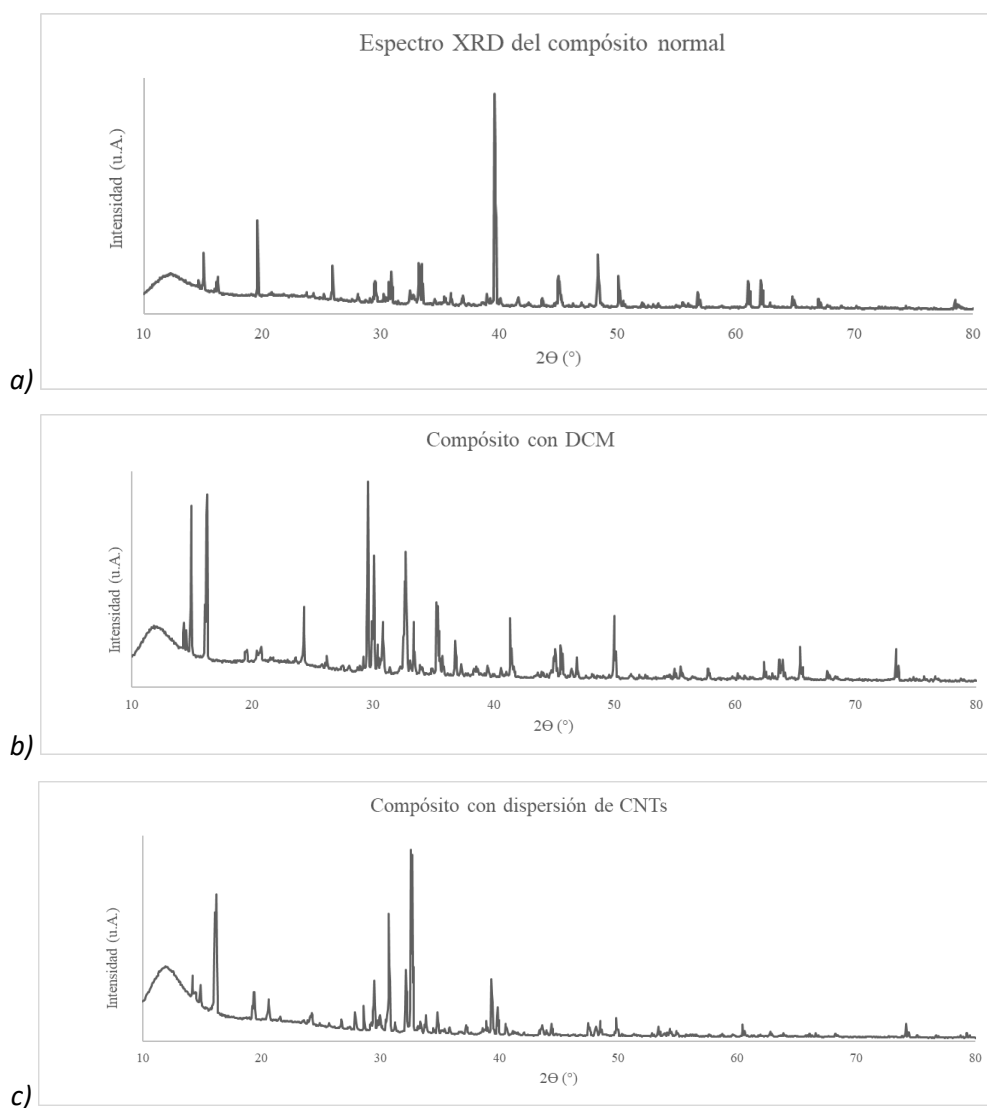


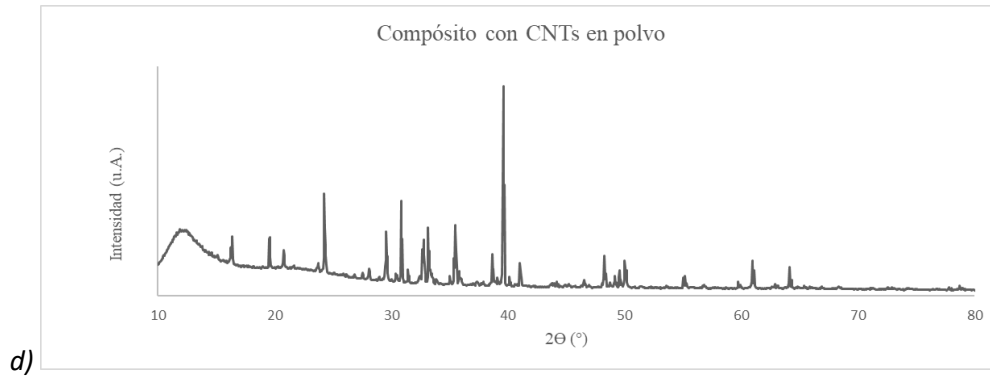
*Figura 24. Ajuste del pico de Si en análisis de XPS.*

A pesar de tratar de analizar el compuesto conjunto de la sal con el Ecoflex mediante diferentes técnicas, haciendo un decaado y con incidencias angulares del haz de rayos X

(ARXPS) en diferentes puntos de la muestra, no fue posible detectar los elementos propios del tartrato. Esto puede deberse al carácter superficial de esta técnica de caracterización, siendo que no alcanza a detectar los granos de sal embebidos en la matriz polimérica (incluso dejándolos en la superficie con un corte transversal, tienen a caerse y dejar huecos).

### 3.3 Caracterización XRD





*Figura 25. Difractogramas de rayos X para compósitos piezoeléctricos: a) normal, b) con 1 mL de DCM, c) con 0.5 mL de dispersión de CNTs en DCM, d) con 10 mg de CNTs en polvo.*

En todos los difractogramas de la *Figura 25* se puede observar la curva característica del Ecoflex (*Figura 8*). Además, en la *Figura 25.a* destacan algunos picos de la sal de Rochelle (*Figura 9*). Los más altos en intensidad corresponden a los planos cristalinos (220), (440) y (210).

Por otra parte, en los compósitos a los que se agregó DCM (*Figura 25.b* y *25.c*), cambian los picos de la sal de Rochelle, ahora los predominantes son (321) y (410). Esto confirma que la adición del solvente está cambiando la cristalización, lo que puede tener efectos en la respuesta piezoeléctrica.

En los compósitos con CNTs aparece un pico cerca de los 25°, el cual corresponde al principal de los nanotubos en el plano cristalino (002). Dicho pico se presenta con mayor intensidad en el compósito con 10 mg de CNTs agregados en polvo (*Figura 25.d*) que en el que tiene 0.5 mL de dispersión, con un total de 0.45 mg de nanotubos (*Figura 25.c*).

### *3.4 Caracterización elástica*

A continuación, se presentan los diagramas esfuerzo-deformación para los compósitos que fueron sometidos a las pruebas de caracterización elástica. Para cada muestra, se calculó el módulo de Young para observar el efecto de la adición de sal de Rochelle y de los MWCNTs en la elasticidad del material Ecoflex.

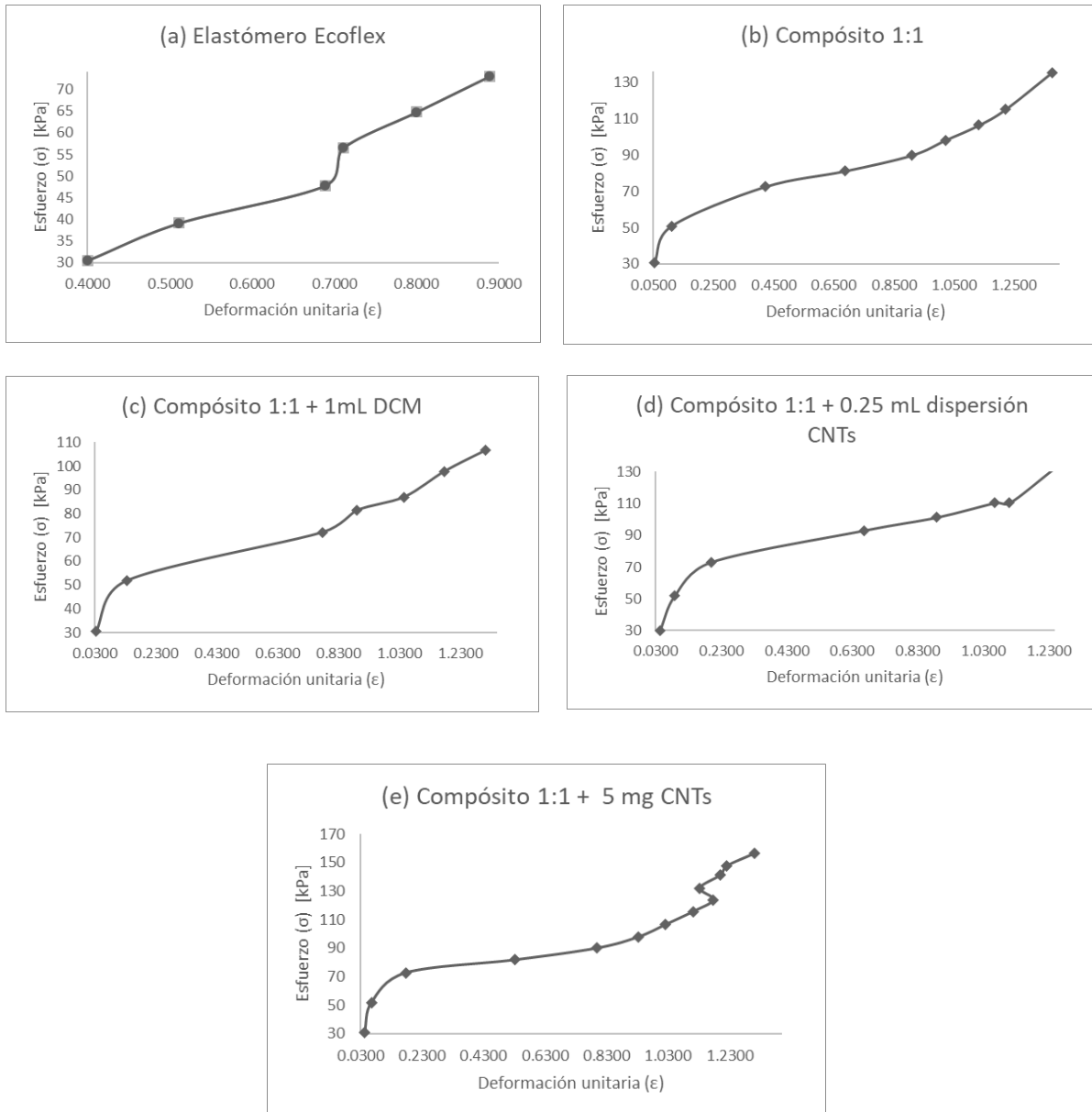


Figura 26 . Diagrama esfuerzo–deformación para los compósitos

Para poder observar la diferencia cuantitativa entre el comportamiento elástico del elastómero Ecoflex puro en comparación con un compósito proporción 1:1 con Sal de Rochelle y también en comparación con compósitos adicionados con distintas cantidades de MWCNTs agregados en dispersión y en polvo, se calculó el valor del módulo de Young para cada uno de los compósitos, encontrando los valores mostrados en la *Tabla 9*. El valor del módulo de Young sirve como un indicador de la elasticidad de un material, entre más

pequeño sea el valor, el material es más elástico; los resultados obtenidos son congruentes con lo esperado ya que, al realizar una comparativa entre el módulo de Young del elastómero Ecoflex solo y el resto de las muestras, se puede observar que los valores de los módulos en los compósitos son mayores que el del elastómero, indicando que la presencia de la Sal de Rochelle, del DCM y de los MWCNTs en los compósitos están afectando las propiedades del material y lo vuelven menos elástico.

*Tabla 9. Módulo de Young para distintos compósitos*

<b>Muestra</b>	<b>Módulo de Young [kPa]</b>
Elastómero Ecoflex	58.88
Compósito 1:1	360
Compósito + 1 mL DCM	212.61
Compósito 1:1 + 0.25 mL dispersión CNTs	260.37
Compósito 1:1 + 5 mg CNTs	274.2

En adición al efecto observado del DCM y los CNTs en la elasticidad del material, también se observó que la presencia de burbujas en los compósitos afecta sus propiedades mecánicas, generando puntos posibles de quiebre en la matriz polimérica de los compósitos al ser sometidos a una fuerza.

### *3.5 Caracterización eléctrica*

A continuación, se presenta una comparativa de la respuesta eléctrica obtenida para cada método de adición de los distintos compósitos con MWCNTs; se compararon los valores de voltaje pico a pico para cada valor de frecuencia de golpeo del elastómero Ecoflex puro (control de ruido en la señal eléctrica), un compósito con proporciones 1:1 y las distintas concentraciones de nanotubos. En el caso de los nanotubos agregados en polvo y en membrana (*Figura 28 y 29*), se encontraron valores máximos cercanos entre sí ( $\geq 230$  mV) mientras que en el caso de los nanotubos agregados en dispersión (*figura 27*), no se

obtuvieron valores tan altos; esto puede ser debido a la cantidad de nanotubos en el compósito, que se ve limitada por el volumen máximo de DCM que se puede utilizar para lograr la polimerización del material, o también, que la presencia de DCM en el compósito esté afectando la cristalización de la Sal de Rochelle, generando que pierda sus propiedades piezoeléctricas. A pesar de presentar valores más pequeños, los compósitos adicionados con dispersión presentan un crecimiento lineal en la respuesta a los valores de frecuencia, lo cual indica estabilidad en la respuesta, para estas muestras, se seguirá por analizar si presentan los mismos valores de voltaje en mediciones hechas en distintos puntos de la muestra, ya que se busca que la respuesta eléctrica del material sea uniforme en todo el compósito.

En el caso de los nanotubos agregados en polvo y en membrana, se encontró que la respuesta eléctrica depende significativamente en los puntos de medición y su cercanía a las aglomeraciones de los nanotubos debido a que no se tiene una distribución uniforme en todo el compósito. Los valores más altos fueron obtenidos con los compósitos adicionados con membrana de MWCNTs funcionalizados, específicamente el compósito con la línea gruesa de membrana, llegando a un valor máximo cercano a los 330 mV en una frecuencia de golpeo de 45 Hz, la respuesta tan alta en comparación con los otros métodos de adición de los nanotubos puede ser causada por la continuidad que brinda la membrana con los nanotubos entre el punto de golpeo y los puntos de contacto con los electrodos, también, en este caso se observó que la proporción de la sal con los nanotubos y la posición de los mismos influyen en la respuesta del material. Otro aspecto que cabe destacar es la estabilidad de la señal en tiempo real de los compósitos, se observó que el compósito que presentó el valor máximo (adicionado con la línea gruesa de membrana funcionalizada) presentó una respuesta más estable que el resto de las muestras (*Figura 30*)

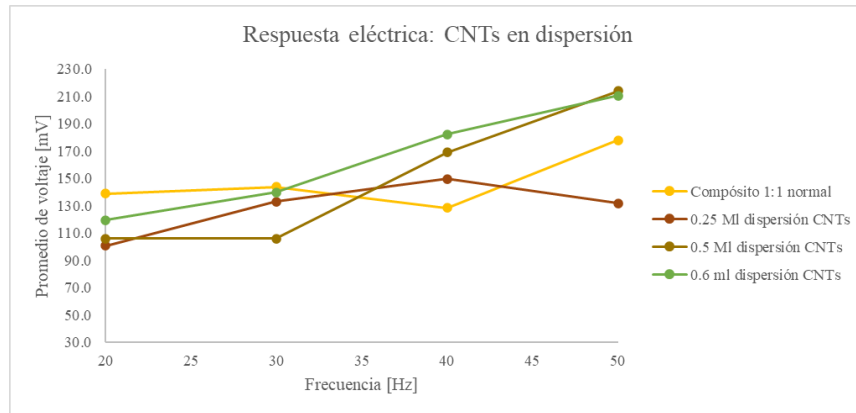


Figura 27. Comparativa respuesta eléctrica CNTs en dispersión

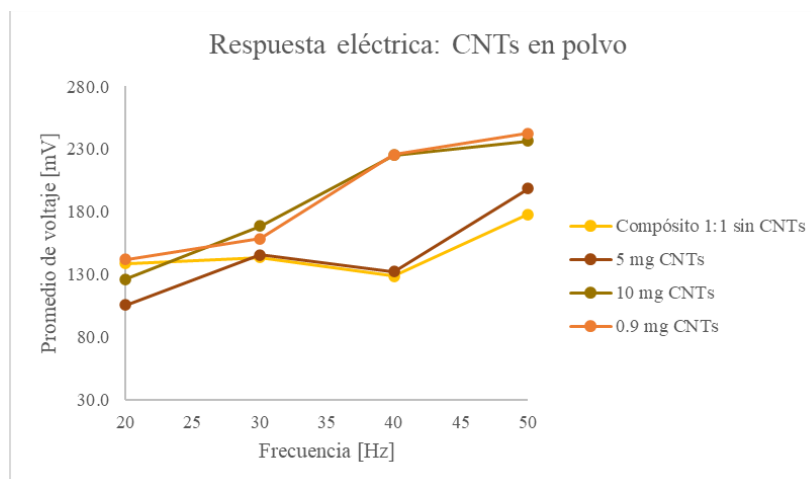


Figura 28. Comparativa respuesta eléctrica CNTs en polvo

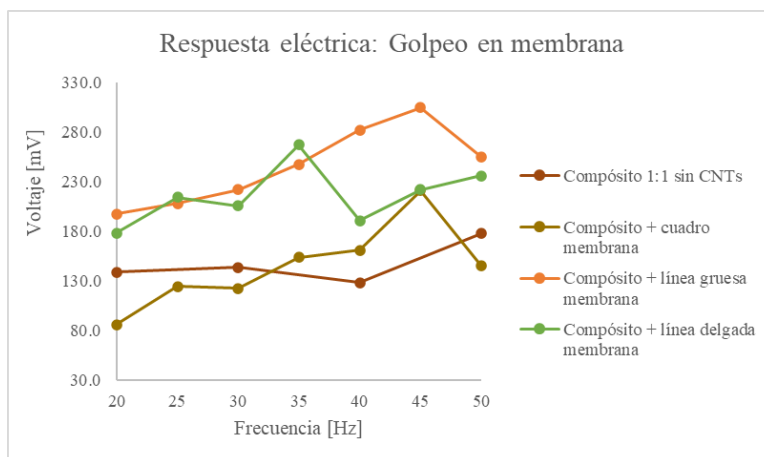


Figura 29. Comparativa respuesta eléctrica CNTs en membrana

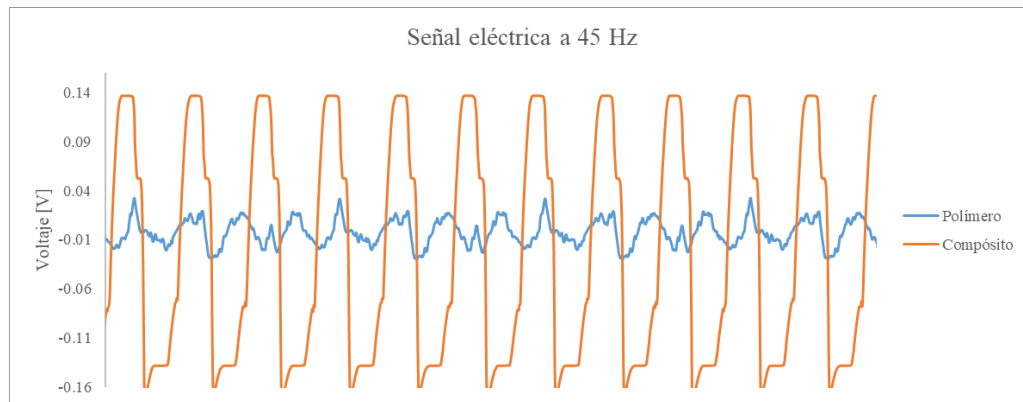


Figura 3010. Señal eléctrica compuesto 1:1 + línea gruesa membrana funcionalizada (45 Hz)

#### 4. Reflexiones de los alumnos sobre sus aprendizajes, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto

- Aprendizajes profesionales

##### **Martha Sofia Curiel**

Durante el desarrollo de este proyecto, logré adquirir diferentes habilidades, tanto académicas como interpersonales y profesionales, entre las que se destaca el trabajo coordinado en equipo y la comunicación eficiente entre los participantes para diseñar y poner en práctica un proyecto de investigación. Desde el punto de vista académico, aprendí a fabricar el compuesto piezoeléctrico y a medir sus propiedades eléctricas, recordé conceptos básicos del montaje de circuitos y de mediciones de propiedades elásticas. Por otro lado, aunque no lo hicimos nosotras en ITESO, también aprendí un poco sobre la síntesis de nanotubos de carbono mediante CVD.

En el proyecto puse a prueba mis conocimientos sobre química, electrónica y síntesis y caracterización de nanomateriales que he aprendido en la carrera, pero también mis habilidades de investigación bibliográfica y elaboración de reportes de proyecto.

Por otra parte, considero que esta experiencia aporta mucho a mi vida profesional porque uno de los principales campos donde me gustaría desempeñarme es en la investigación, y

de esta forma pude conocer un poco mejor la forma de trabajo y familiarizarme con las dinámicas.

### ***Carla Angélica Medina***

Gracias a este proyecto he podido desarrollar habilidades que me han servido como herramientas para mi futuro profesional, como lo son el trabajo en equipo, la comunicación efectiva y asertiva, el trabajo de investigación, el diseño y elaboración de un proyecto y la resolución de problemas. Estas habilidades me ayudaron a conocer un panorama más amplio sobre lo que será ser un profesionalista y ejercer en un ambiente laboral.

En el planteamiento y desarrollo de este proyecto, pude poner a prueba mis conocimientos en áreas como síntesis y caracterización de nanomateriales, química, ciencia de materiales y electrónica al fabricar un compuesto piezoeléctrico, caracterizar sus propiedades eléctricas y elásticas y estudiar el efecto de la adición de nanotubos de carbono en la respuesta y las propiedades del material.

Considero que el trabajar en un proyecto de investigación enfocado en resolver problemáticas con enfoque sustentable me ayudó a visualizar de mejor manera los alcances que tiene mi área de estudios y el ámbito en el que yo quisiera poder trabajar en un futuro, que es el de la investigación.

- [Aprendizajes sociales](#)

### ***Grupal***

Al conocer las problemáticas actuales en torno al desarrollo de las energías renovables, vemos que podemos aportar algo para que en un futuro incluso los dispositivos pequeños puedan ser alimentados por ellas, lo que además podría ayudar en la mejora de la calidad de vida de las personas, puesto que resulta más conveniente, cómodo y menos costoso a largo plazo.

Fuimos capaces de desarrollar nuestro proyecto teniendo muy claro nuestros objetivos iniciales, y además tenemos un auténtico interés para darle seguimiento y poner en práctica

nuestros conocimientos, siempre con el apoyo de otras personas conocedoras del tema, como nuestra asesora PAP.

Con este proyecto se puede beneficiar a todos los grupos sociales, ya que no está enfocado en un solo sector, y en cuanto a los ámbitos de la sociedad en los que pudimos innovar, fueron a partir de reconocer las necesidades de los demás y siempre estar buscando el bienestar común. Desde el inicio del planteamiento del proyecto se buscaban soluciones a la problemática que además pudieran disminuir el impacto ambiental y las consecuencias que han traído el uso de otras energías no renovables. Además, la investigación bibliográfica nos dio nuevas ideas e inspiración de otras personas que también han trabajado en esto, puesto que es una problemática presente a nivel mundial.

Nuestra visión ahora es mucho más amplia, ya que descubrimos una gran necesidad que se tiene y que aún no está resuelta, con grandes repercusiones que pueden afectar el bienestar, pero que también tiene posibles soluciones como la planteada en este proyecto.

- [Aprendizajes éticos](#)

### ***Martha Sofía Curiel***

Las principales decisiones fueron en torno a los experimentos. Con base en la investigación previa, en equipo decidimos cuáles serían los pasos a seguir para lograr nuestros objetivos. Además, durante el desarrollo se presentaron algunos obstáculos que tuvimos que resolver a partir de nuestros conocimientos sobre las propiedades de los nanomateriales y los parámetros de las síntesis, decidiendo el mejor camino que nos llevara a superar esos obstáculos y lograr los resultados esperados.

Esta experiencia me lleva a querer seguir aprendiendo sobre dispositivos de captación de energía que puedan ser aplicados de alguna forma para mejorar la calidad de vida de las personas. Me interesa continuar mi camino profesional relacionado con esta área, buscando ayudar a otros e innovar en el ámbito de investigación de materiales.

### ***Carla Angélica Medina***

Durante estos seis meses de trabajo, como equipo tuvimos que tomar decisiones para el desarrollo del proyecto, decisiones que tomamos a base de la experiencia y los conocimientos que fuimos adquiriendo y siempre con el objetivo final en mente, buscando las mejores soluciones.

Considero que, en cualquier tipo de proyecto o iniciativa, específicamente en el ámbito científico, se debe de tener como prioridad el aportar algo bueno a la sociedad y a resolver problemáticas existentes de una manera sustentable. Es gracias a proyectos como este, en el cual trabajamos en el desarrollo de materiales para una tecnología de energía renovable que puede utilizarse en el ámbito médico, que puedo reforzar que, como profesionalista, el mayor propósito que quiero encontrar en mi trabajo, es el de ayudar al planeta y a mejorar la calidad de vida de las personas a través de la ciencia.

### ***Grupal***

Esta experiencia nos deja muchos aprendizajes entorno a como nuestras decisiones pueden ser clave para lograr con éxito nuestros objetivos ya sean personales o sociales, teniendo en cuenta todos los aspectos que lo rodeen que puedan traer consecuencias o cambios en la iniciativa planteada. Además, esto deja muy en claro que debemos siempre buscar un bienestar común para poder sentirnos plenos y sacarle provecho a nuestra carrera.

- [Aprendizajes en lo personal](#)

### ***Martha Sofia Curiel Medina***

El PAP me ayudó a darme cuenta de algunas habilidades que tengo pero que nunca había podido poner en práctica, entre las que se encuentra el uso de equipo y material de laboratorio. También, desde un punto de vista más personal, pude distinguir mis motivaciones en lo que respecta a un proyecto, lo que me inspira y me anima a seguir adelante.

Por otro lado, tuve la oportunidad de convivir y conocer un poco más a mis compañeros de trabajo, a los técnicos y encargados de laboratorio. Con esto pude relacionarme con diferentes formas de pensar y de trabajar, lo que también enriqueció mucho mi experiencia y me ayudó a crecer como persona.

Trabajar estos meses en investigación me ayudó a definir un poco mejor mi proyecto de vida porque pude tener un acercamiento a una de las actividades en las que me gustaría desempeñar mi vida profesional y me gustó mucho.

### ***Carla Angélica Medina***

Este proyecto me brindó la oportunidad de reconocer mis fortalezas y mis debilidades en distintos ámbitos, en el trabajo en equipo, en el desarrollo de proyectos, en la expresión oral y escrita, entre otros. Tuve la oportunidad de trabajar y de convivir con distintas personas que aportaron mucho a mi experiencia y me enseñaron distintos métodos de trabajo y maneras de pensar.

Considero que esta experiencia me ayudó a visualizar mi proyecto de vida de una manera más clara, me gustó poder aplicar de manera teórica y experimental los conocimientos que he adquirido en la carrera y observar la manera en la que nuestra área de estudios puede desarrollar soluciones para problemáticas actuales. Aprendí que la investigación es algo que disfruto y en lo que me gustaría poder trabajar algún día.

## **5. Conclusiones**

Durante el desarrollo de este proyecto se trabajó con la fabricación y caracterización de un compuesto piezoeléctrico hecho a base de la sal de Rochelle y un polímero elástico, adicionando nanotubos de carbono para aumentar la conductividad y mejorar la señal eléctrica generada al ser estimulado mecánicamente. Además, se realizaron diferentes caracterizaciones para analizar las propiedades morfológicas, de composición química, elásticas y eléctricas del compuesto, utilizando variedad de técnicas como SEM, XPS y XRD.

Se observó que la adición de la dispersión de nanotubos tiene un efecto negativo en la elasticidad y la señal eléctrica, debido a que el DCM genera burbujas en el compósito y además afecta la cristalización de la sal y con ello su piezoelectricidad. Sin embargo, la adición de los nanotubos en polvo y en forma de membrana sí presentó un efecto positivo con el aumento en la señal eléctrica producida, por lo que se concluye que sí se logró mejorar del rendimiento del compósito alcanzando valores de más de 300 mV.

Por otro lado, también se trabajó con el circuito de lectura para amplificar y eliminar el ruido de la señal eléctrica generada por el compósito, lo que aún tiene pasos pendientes por hacer en un futuro, así como la implementación y prueba del circuito de carga acumulada que permitirá una mejor caracterización de las muestras.

La adición de los CNTs al compósito piezoeléctrico resultó muy provechosa, por lo que se seguirá trabajando con ellos y sus diferentes formas de adición, buscando además un solvente que no afecte las propiedades elásticas y eléctricas del sistema.

## 6. Bibliografía

- Abdulhameed, A., Wahab, N. Z. A., Mohtar, M. N., Hamidon, M. N., Shafie, S., & Halin, I. A. (2021). Methods and applications of electrical conductivity enhancement of materials using carbon nanotubes. *Journal of Electronic Materials*, 50, 3207-3221.
- Aldape, D., & Delgado, J. (2012). Microgeneración y almacenamiento de energía para sistemas autónomos de sensado. 107.
- Alvarado, U., Juanicorena, A., Adin, I., Sedano, B., Gutiérrez, I., & de Nó, J. (2012). Energy harvesting technologies for low-power electronics. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 23(8), 728–741.
- Andrade, J. D. (1985). X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). *Surface and Interfacial Aspects of Biomedical Polymers: Volume 1 Surface Chemistry and Physics*, 105-195.

- Braña, G. O. (2016). *Optimización de la activación eléctrica y de la respuesta piezoeléctrica de polímeros espumados y modelización de los procesos electrostáticos internos* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Cerdeiras Montero, E. (2016). Materiales piezoeléctricos derivados del  $(\text{Bi}_{0,5}\text{Na}_{0,5})\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ : Preparación y estudio de las propiedades funcionales [Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona]. En TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). <http://www.tdx.cat/handle/10803/400829>
- Eka Putri, G., Rahayu Gusti, F., Novita Sary, A., & Zainul, R. (2019). Synthesis of silver nanoparticles used chemical reduction method by glucose as reducing agent. *Journal of Physics: Conference Series*, 1317, 012027.
- Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2).
- hmgong.wiki. (s. f.). Titanato de circonato de plomo Propiedades electrocerámicas y Usos. Recuperado 11 de noviembre de 2022, de [https://hmgong.es/wiki/Lead\\_zirconate\\_titanate](https://hmgong.es/wiki/Lead_zirconate_titanate)
- IIES-UNAM, 2020 D.R. (s. f.). <https://www.iies.unam.mx/el-impacto-de-la-basura-electronica-en-mexico/>
- Kamalakaran, R., Terrones, M., Seeger, T., Kohler-Redlich, P., Rühle, M., Kim, Y. A., ... Endo, M. (2000). *Synthesis of thick and crystalline nanotube arrays by spray pyrolysis. Applied Physics Letters*, 77(21), 3385–3387.
- Kao, K. C. (2004). 4—Ferroelectrics, Piezoelectrics, and Pyroelectrics. En K. C. Kao (Ed.), *Dielectric Phenomena in Solids* (pp. 213-282). Academic Press.
- Khan, H., Yerramilli, A. S., D'Oliveira, A., Alford, T. L., Boffito, D. C., & Patience, G. S. (2020). Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy—XRD. *The Canadian journal of chemical engineering*, 98(6), 1255-1266.

- Kleim, R. (2018). Understanding and Implementing Charge Amplifiers for Piezoelectric Sensor Systems. En <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-and-implementing-charge-amplifiers-for-piezoelectric-sensor-s/>
- Lemaire, E., Borsa, C. J., & Briand, D. (2015). Green piezoelectric for autonomous smart textile. *Journal of Physics: Conference Series*, 660, 012082.
- Liu, C. X., & Choi, J. W. (2012). Improved dispersion of carbon nanotubes in polymers at high concentrations. *Nanomaterials*, 2(4), 329-347.
- Mallinckrodt Baker, Inc. (2008). POTASSIUM SODIUM TARTRATE. [https://pr.vwr.com/assetsvc/asset/en\\_US/id/8270551/contents](https://pr.vwr.com/assetsvc/asset/en_US/id/8270551/contents)
- Medina, ME., Galván, LE., & Reyes, RE. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 19(74), 49-58.
- Melzer, M., Mönch, J. I., Makarov, D., Zabala, Y., Cañón Bermúdez, G. S., Karnaushenko, D., Baunack, S., Bahr, F., Yan, C., Kaltenbrunner, M., & Schmidt, O. G. (2015). Wearable Magnetic Field Sensors for Flexible Electronics. *Advanced Materials*, 27(7), 1274-1280.
- Mertz, J. (2019). *Introduction to optical microscopy*. Cambridge University Press.
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). Scanning electron microscopy (SEM): A review. *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX* (pp. 7-9).
- MohdIsa, W., Hunt, A., & HosseinNia, S. H. (2019). Sensing and Self-Sensing Actuation Methods for Ionic Polymer–Metal Composite (IPMC): A Review. *Sensors*, 19(18), 3967. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/s19183967>

Nguyen, H. T., & Thao, P. T. B. (2021). Preparation, composition, phase transition and electrical conductivity of two novel ferroelectric composites from Rochelle salt filled with pristine and oxidized MWCNT. *Ferroelectrics*, 585(1), 274-283.

Noguera, B. (2021). Los elastómeros: Características y usos. En <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/>

Ortega, Gustavo. (2016). OPTIMIZACIÓN DE LA ACTIVACIÓN ELÉCTRICA Y DE LA RESPUESTA PIEZOELÉCTRICA DE POLÍMEROS ESPUMADOS Y MODELIZACIÓN DE LOS PROCESOS ELECTROSTÁTICOS INTERNOS. 10.4995/Thesis/10251/62408.

Ortiz-Domínguez, M., & Cruz-Avilés, A. (2022). Determinación del módulo de Young. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 9(17), 52-63.

Osorio Vázquez. (s. f.). Transductores eléctricos sensibles a estímulos magneto. *Mecánicos*.

Paar, A. (s.f.) X-ray diffraction (XRD). En <https://wiki.anton-paar.com/co-es/difraccion-de-rayos-x-xrd/>

Performance Polymers. (s.f.) ecoflex®. En [https://plastics-rubber.basf.com/southamerica/es/performance\\_polymers/products/ecoflex.html#accordion\\_v2-7a40d01bdd-item-32384191a0](https://plastics-rubber.basf.com/southamerica/es/performance_polymers/products/ecoflex.html#accordion_v2-7a40d01bdd-item-32384191a0)

Rahaman, M., Aldalbahi, A., Govindasami, P., Khanam, N., Bhandari, S., Feng, P., & Altalhi, T. (2017). A New Insight in Determining the Percolation Threshold of Electrical Conductivity for Extrinsicly Conducting Polymer Composites through Different Sigmoidal Models. *Polymers*, 9(12), 527. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/polym9100527>

- Rasouli, M., & Phee, L. S. J. (2010). Energy sources and their development for application in medical devices. *Expert Review of Medical Devices*, 7(5), 693–709.
- Rosa, J. R. C. (2014). Desarrollo de (bio) sensores basados en nuevos composites: Materiales polímeros conductores-nanopartículas metálicas y carbono-nanopartículas metálicas (Doctoral dissertation, Universidad de Cádiz).
- Rocha-Rangel, E, Rodríguez-García, JA., Salazar-Parra, P., Díaz-Castañeda, MN., & Zapata-Cruz, JR. (2012) Impacto de la basura electrónica. *Revista Virtual Pro*.
- Satishkumar, B. C., Govindaraj, A., & Rao, C. N. R. (1999). *Bundles of aligned carbon nanotubes obtained by the pyrolysis of ferrocene–hydrocarbon mixtures: role of the metal nanoparticles produced in situ*. *Chemical Physics Letters*, 307(3-4), 158–162.
- Shahinpoor, M., & Kim, K. J. (2001). Ionic polymer-metal composites: I. Fundamentals. *Smart Materials and Structures*, 10(4), 819–833.
- Shyju, T. S., Anandhi, S., & Gopalakrishnan, R. (2012). Comparative studies on conventional solution and Sankaranarayanan–Ramasamy (SR) methods grown potassium sodium tartrate tetrahydrate single crystals. *CrystEngComm*, 14(4), 1387–1396.
- Thermofisher (s.f.). *Scanning electron microscopy working principle - A comprehensive review*. ThermoFisher. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Reference-Materials/WP0016-scanning-electron-microscopy-working-principle.pdf>
- Viñas, W. G., & Mancini, H. L. (1998). *Ciencia de los Materiales*. Newbook.
- Wang, H., Qiao, X., Chen, J., & Ding, S. (2005). Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 256(2-3), 111–115.

Wang, Z. L. (2013, octubre 3). Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors (world) [Review-article]. ACS Publications; American Chemical Society.

Wikimedia Foundation. (2019, August 31). *Sal De Seignette*. Wikipedia. [https://es.wikipedia.org/wiki/Sal\\_de\\_Seignette](https://es.wikipedia.org/wiki/Sal_de_Seignette)

Yuliantoro, H., Kusumastuti, Y., Mindaryani, A., Handayani, M., & Rochmadi. (2021). *Functionalization of single-walled carbon nanotubes with a HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> mixture through different treatments: A DFT supported study. 4TH INTERNATIONAL SEMINAR ON CHEMISTRY.*

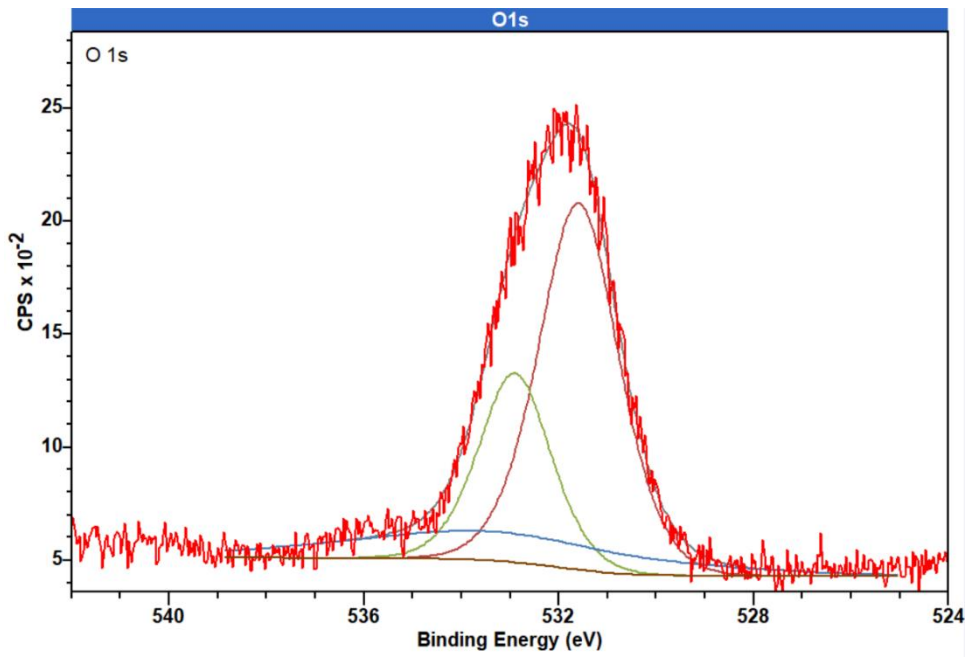
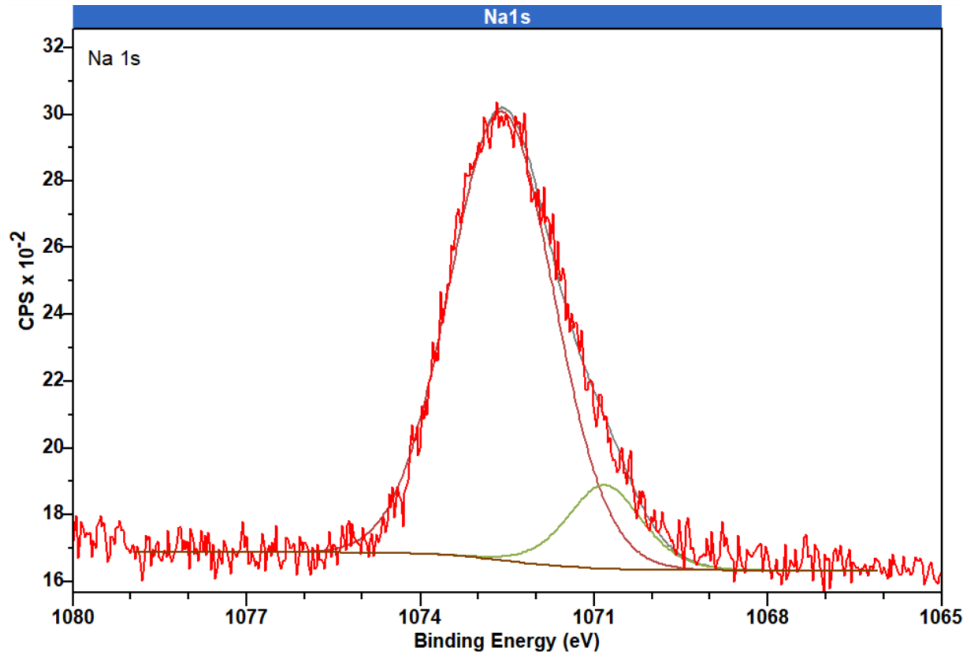
Zahnstecher, B. (2017, octubre 5). Battery Power Online \textbar The Role of Power Electronics and Energy Harvesting in the Future of Batteries. <https://www.batterypoweronline.com/articles/the-role-of-power-electronics-and-energy-harvesting-in-the-future-of-batteries/>

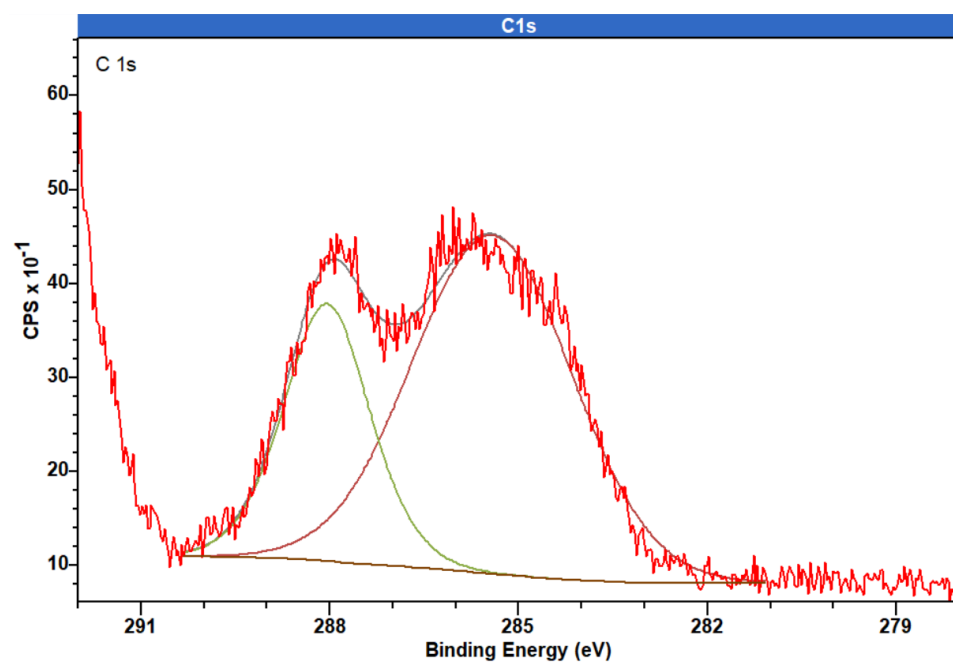
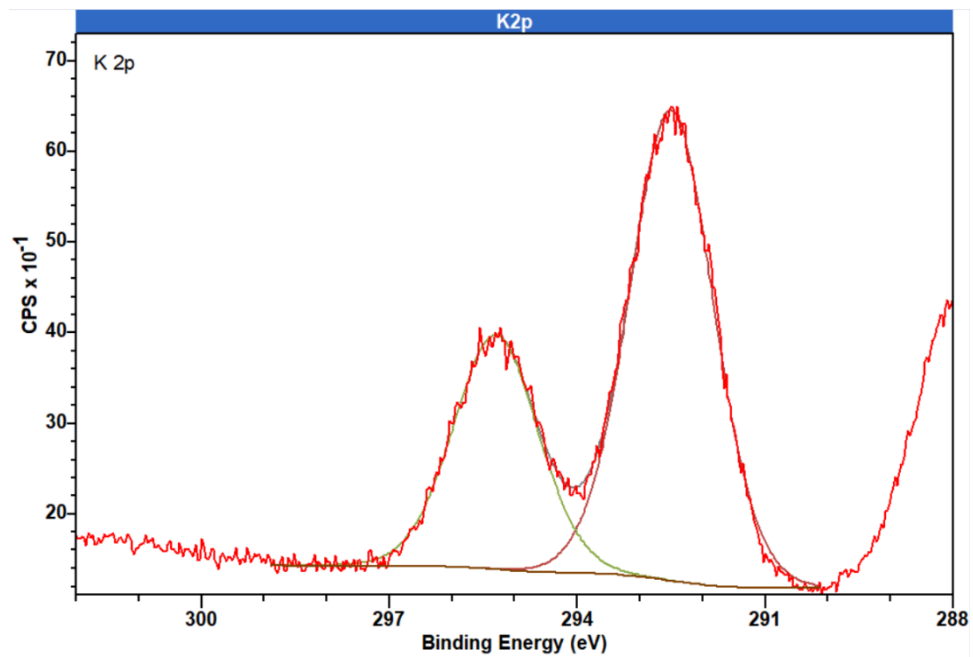
Zhang, Y., Ren, E., Tang, H., Li, A., Cui, C., Guo, R., ... Shen, H. (2020). Carbon nanotubes/acetylene black/Ecoflex with corrugated microcracks for enhanced sensitivity for stretchable strain sensors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.

## Anexos

### Anexo 1. Ajuste de picos para análisis XPS.

Sal de Rochelle





Ecoflex

